

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.009

承德市大气污染物特征及潜在来源分析^①

孙德尧¹, 张科², 吴才武¹, 杨越¹,
孙丽³, 李亚男³, 孙维悦⁴, 武智勇¹

1. 河北民族师范学院 资源与环境科学学院, 河北 承德 067000;
2. 天津天融环境科技发展有限公司, 天津 300380;
3. 哈尔滨师范大学 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025;
4. 哈尔滨师范大学 生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025

摘要: 承德市是京津冀地区北部的重要生态屏障, 为了解承德市大气环境质量特征及污染物潜在来源, 选取承德市 2016—2019 年大气污染物的常规 6 项数据(SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10}), 分析了承德市大气污染物质量浓度的变化特征, 同时利用 Pearsons 相关分析以及 HYSPLIT 模型对污染物来源进行解析. 结果表明: 近 4 年, 承德市环境空气质量明显提高, 总体优良达标率为 87.29%; 首要污染物主要是 PM_{10} , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 , 其中 PM_{10} 是全年空气质量的主要影响因素; 机动车尾气、工业生产、扬尘和生物质燃烧是污染物的主要来源. 外源污染物输送路径主要包括西北气团、东南气团及北方气团, 其中东南气团污染物质量浓度最高. 西北气团质量浓度次之, 北方气团质量浓度相对较低. 从潜在源区来看, O_3 的高值区范围最大, 主要分布于东南以石家庄为中心的华北平原地区; NO_2 , CO , PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 高值区范围次之, 主要分布于内蒙古中西部地区及华北平原地区; SO_2 的高值区范围最小, 分布比较分散. 总体来说西北及东南传输通道是承德市大气外源输入的主要源区.

关键词: 承德市; 大气污染; 轨迹分析; 潜在源区

中图分类号: P421, X51

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)12-0053-10

Variation Characteristics and Potential Source Analysis of Atmospheric Pollutants in Typical Cities of Chengde City

SUN Deyao¹, ZHANG Ke², WU Caiwu¹, YANG Yue¹,
SUN Li³, LI Yanan³, SUN Weiyue⁴, WU Zhiyong¹

1. Department of Resources and Environmental Science, Hebei Normal University for Nationalities, Chengde Hebei 067000, China;
2. Tianjin Tianrong Environmental Technology Development Company, Tianjin 300380, China;
3. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China;
4. College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

Abstract: In order to study the variation characteristics of air pollutants in the interrupted areas of farming pastoral ecotone in China, six routine data (SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}) of air pollutants in

① 收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401589); 中央高校基本科研业务费专项资金(2017-KYYWF-0139); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2015320).

作者简介: 孙德尧, 讲师, 硕士, 主要从事环境地理学的研究.

通信作者: 杨越, 教授.

Chengde City from 2016 to 2019 were selected. Based on the monitoring data of air pollutants, we investigated the concentration variation of air pollutants in Chengde City from 2016—2019, and the source of pollutants was analyzed by using correlation analysis, HYSPLIT, PSCF and CWT model. The results show that Chengde's air quantity rise to some extent in past four years, but the days with excellent or good quality is still in the majority, with an eligibility rate of 87.29%. The main pollutants are mainly PM_{10} , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , PM_{10} is a long-term influencing factor of air quality. CO and NO_2 may come from motor vehicle exhaust and industrial students. $\text{PM}_{2.5}$ comes from motor vehicle exhaust, dust, and biomass combustion, CO and SO_2 may be the products of fossil fuel combustion and industrial waste gas. Motor vehicle exhaust, industrial production, dust, and biomass combustion are the main sources of pollutants. The transport routes of exogenous pollutants mainly include northwest air mass, southeast air mass and northern air mass, and the concentration of various pollutants in southeast air mass is relatively high. Northwest air mass concentration is second, northern air mass is relatively low and relatively clean. O_3 has the largest potential source high-value area, and the high-contribution area is mainly distributed in the North China Plain area with Shijiazhuang as the center in the southeast. NO_2 , CO, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ high-value areas are next, and the central and western regions of Inner Mongolia and the North China Plain in the southeast are its main contributing areas, and the SO_2 high-value areas are the smallest. The distribution of high value contribution areas is more scattered. Generally speaking, the northwest and southeast transmission channel is the main source area for the atmospheric external input of Chengde City.

Key words: Chengde City; air pollution characteristic; Trajectory analysis; potential sources

近年来,伴随经济的快速发展和城市化的推进,大量的硫化物、氮氧化物和细颗粒等有害物质被排放到大气中,致使雾霾天气频现,空气质量逐年下降. 大气污染成为我国社会经济发展的重要制约因素,根据世界银行和世界卫生组织公布的数据,2013 年劳动力收入损失约 2 250 亿美元^[1]. 2014 年约有 1/8 的全球人口死亡与大气污染有关^[2]. 大气污染问题已对人体健康造成了极大威胁,受到了全社会的广泛关注. 文献[3]采用质心分析方法、统计分析方法对华北平原 28 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征进行了研究. 文献[4]对我国大气污染特征进行了分析,提出了人口加权空气质量指数. 文献[5]采用相关分析法,分析了长江三角洲 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间的相关性. 文献[6]结合人口密度、单位能耗、GDP 等社会经济指标研究了其与空气质量的相关性. 此外,许多学者针对我国特大型城市也开展了类似研究^[7-8],但多集中于经济快速发展的地区,针对冀北山区中小城市大气污染物的相关研究鲜有报道.

华北平原是我国大气污染最为严重的地区之一^[9]. 承德市地处冀北山区,南邻华北平原,是连接京津冀辽蒙的重要节点,同时也是京津冀地区北部的重要生态屏障. 承德市环境空气质量具有明显的季节性特征,冬、春季污染物质量浓度较高,空气质量较差,承德曾出现持续多日区域性重污染灰霾天气. 同时由于地形复杂,城市化进程加快,机动车尾气排放量增长,外源输入等因素,造成承德大气污染时空具有不平衡性,大气环境仍然面临极大挑战,因此对其大气污染现状的研究具有重要现实意义. 当前对承德市已开展的研究仅限于单一污染物 $\text{PM}_{2.5}$, 缺乏多种污染物的综合研究,且研究时间较短,连续性较差^[10]. 本文基于承德市 2016—2019 年 SO_2 , NO_2 , CO, O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度数据,分析了承德市大气污染物质量浓度的时序变化特征,并利用相关分析以及 HYSPLIT、PSCF 和 CWT 模型对其来源进行解析,旨在为改善承德市管理决策以及开展城市空气污染治理提供一定的科学依据和参考.

1 资料与方法

1.1 研究区域

承德市($40^{\circ}12' - 42^{\circ}37' \text{N}$, $115^{\circ}54' - 119^{\circ}15' \text{E}$)地处华北和东北两个地区的过渡地带,南临北京与天津,背靠蒙辽. 地势由西北向东南阶梯下降,为温带大陆性季风型山地气候,四季分明,春季干旱多风,夏季温和多雨,秋季气候凉爽,冬季寒冷少雪. 地处谷地,四周环山,河谷盆地内气流闭塞,地面气流受燕山影响较大,静风和逆温频率高,不利于污染物扩散,易出现大气污染事件. 主导风向为西南风,其次是西北风,年平均风速为 1.4~4.3 m/s.

1.2 数据来源及处理

从中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn>)获得承德 5 个国控监测站点,数据取自 2016 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日,数据在发布前均经过严格质量控制. 由于本文 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , CO 和 O_3 的统计基础数据为小时数据,因此根据每天 24 h 数据求得日均值,根据日均值求得月均值,根据月均值求得季均值. 后向轨迹模型资料为美国国家环境预报中心提供的 2016—2019 年全球资料同化系统(GDAS)数据,空间分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$.

本文采用《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)和《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)对污染物数据和空气质量指数(AQI)进行评价,同时采用 SPSS 软件对污染物进行统计分析,并利用 TrajStat 软件研究污染物的输送轨迹和潜在贡献源区.

1.3 HYSPLIT 后向轨迹模式

本文所采用的后向轨迹模式是由美国国家海洋及大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局(BOM)共同研发的轨迹计算模式 HYSPLIT^[11]. 本文利用 TrajStat 后续软件来进行承德市的后向轨迹和聚类分析^[12]. 由于 500 m 高度的风场能较为准确地反映边界层的平均流场特征^[13],所以将模拟高度选为 500 m. 本研究以承德市城区($40^\circ57'5''\text{N}$, $117^\circ57'48''\text{E}$)为轨迹起始点,计算 2016—2019 年逐日到达承德市的 72 h 后向轨迹,以便于反映气流特征.

1.4 潜在源区分析法

潜在源区贡献函数(PSCF)是由 Ashbaugh 等于 1985 年提出的,目前已经在多个领域得到广泛应用,其主要通过气流的后向轨迹和某要素值的结合来求解该污染物要素值的潜在源区位置^[14].

1.5 质量浓度权重轨迹分析法(CWT)

CWT 是一种网格化识别源区的方法,通过计算污染物在源区网格的平均权重质量浓度来分析其对目标网格的污染贡献^[15].

2 结果与讨论

2.1 承德市空气质量特征

空气质量指数(AQI)是定量描述空气质量等级的无量纲指数. 如表 1 所示,2016—2019 年承德市日值 AQI 总有效监测天数为 1 455 d, AQI 均值为 67.59,空气质量主要以优、良为主,优良天数为 1 270 d,达标率为 87.29%,轻度污染及以上天数为 185 d,超标率为 12.71%. 2019 年与 2016 年相比,一级空气质量天数增加了 51.72%,三级和四级空气质量天数分别下降了 59.18%和 62.50%,五、六级空气质量天数均为 0,表明 4 年来环境空气质量改善明显. 这可能与近年来承德市加快推进气源工程建设,煤电行业超低排放改造,施工扬尘环境监管的加强有一定关系^[16].

表 1 2016—2019 年承德市 AQI 级别天数统计表

年份	天数 d						AQI	优良率/%	污染率/%	监测天数
	一级	二级	三级	四级	五级	六级				
2016	116	188	49	8	5	0	71.67	83.06	16.94	366
2017	101	215	40	4	3	1	70.41	86.81	13.19	364
2018	101	208	36	12	3	1	70.54	85.60	14.40	361
2019	176	165	20	3	0	0	57.75	93.68	6.32	364

近 4 年, AQI 的月均变化趋势较为相似,均呈双峰周期型(图 1). 2—5 月和 8—11 月分别是两个迅速上升期, 5—8 月和 11—2 月呈迅速下降趋势, 冬春季节 AQI 较高, 夏季 AQI 呈现逐年下降趋势, 夏季主要表现为臭氧污染. 冬春季节出现个别时间污染物严重超标情况, 空气质量为重度污染和中度污染, 这可能与冬春季取暖和周边城市大气输送有关. 夏季空气质量最好, 冬春季相对较差. 承德市首要污染物主要是 PM_{10} , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 (图 2), 其中 PM_{10} 为首要污染物的天数最多, 为 1 057 d; 其次为 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$, 分别为 216 d 和 116 d, NO_2 为首要污染物的天数最少, 为 60 d. 从季节方面来看, 首要污染物为 PM_{10} 的情况在夏季出现频次低, 春、秋、冬季均较高. 污染物为 O_3 的情况主要出现在夏季. 首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 的情况出现在冬季、秋末和初春.

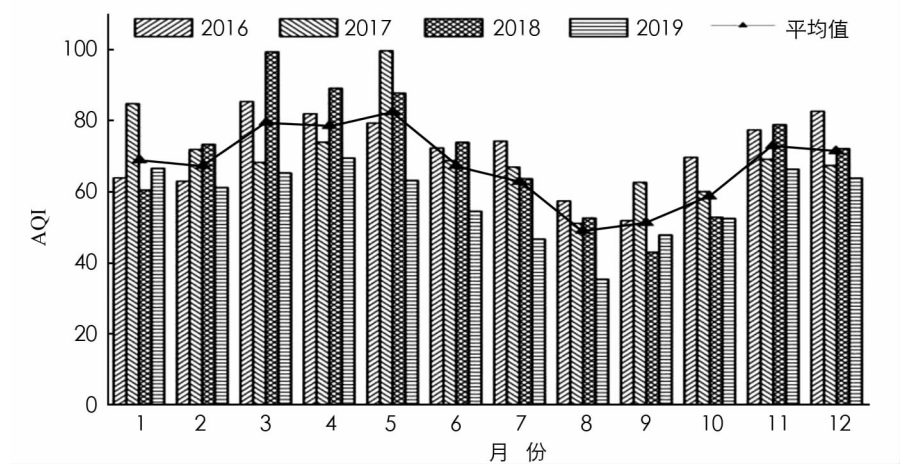


图 1 2016—2019 年承德市 AQI 月均值分布

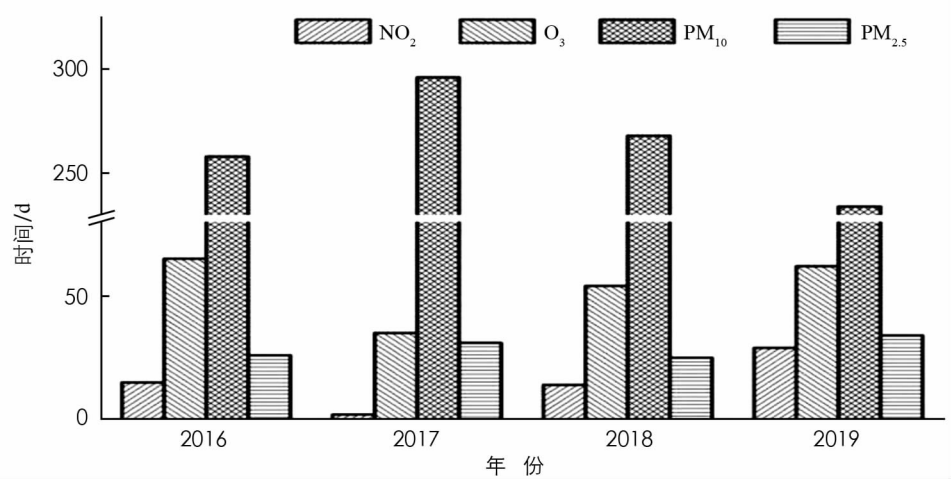


图 2 2016—2019 年承德市首要污染物天数统计

2.2 大气污染物时间变化特征

2.2.1 污染物总体变化特征

从表 2 可以看出, 2016—2019 年承德市 AQI,SO₂,NO₂,CO,O₃,PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度变化区间分别为 17~410,2~59 ug·m⁻³,5~87 ug·m⁻³,0.20~4 ug·m⁻³,6~155 ug·m⁻³,12~692 ug·m⁻³,12~692 ug·m⁻³. 4 年间, 各项污染物全年质量浓度值变化波动较大, 主要可能受季节、边界扩散等影响^[17]. 4 年间, AQI,SO₂,NO₂,CO,O₃,PM_{2.5}和 PM₁₀的质量浓度均值分别为 68.35,11.29 ug·m⁻³,31.91 ug·m⁻³,0.86 ug·m⁻³,92.79 ug·m⁻³,29.68 ug·m⁻³,75.19 ug·m⁻³. SO₂,NO₂,CO,O₃ 浓度的年均值呈逐年减少的趋式. 平均污染物质量浓度未超过国家环境空气污染物一级质量浓度年限值, 仅有 NO₂ 在 2016 年超出国家环境空气污染物一级质量浓度年限值. PM_{2.5},PM₁₀的质量浓度在 2017—2018 年略有升高, 呈单峰型, PM_{2.5}未超出国家环境空气污染物一级质量浓度年均限值, PM₁₀超出国家环境空气污染物一级质量浓度年均限值 0.87 倍. 根据相关研究^[18], 通过利用 NO₂ 和 SO₂ 质量浓度的比值, 以及 PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度的比值, 能进行不同大气污染物、颗粒物的来源的识别. 4 年间, NO₂ 和 SO₂ 质量浓度之比分别为 1.08,2.05,2.52,2.34, 表明交通移动源对污染的贡献度逐步增大, 交通污染应受到重视; PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度比分别为 0.32,0.42,0.39,0.47, 表明污染可能与沙尘天气影响有关.

2.2.2 季节及月变化特征

承德市大气污染物质量浓度在不同季节、月份具有明显差异, 且不同年份之间一定时期内的大气情况有所不同. 因此, 了解不同年份相同时间段污染物质量浓度有现实意义.

2016—2019 年承德市大气污染物季节、月份变化特征明显. 由表 3, 从季节来看, 除 O₃(质量浓度从大到小依次为夏季、春季、秋季、冬季)、PM₁₀(质量浓度从大到小依次为春季、冬季、秋季、夏季)和 SO₂(质量浓度从大到小依次为冬季、春季、夏季、秋季)外, 其他污染物质量浓度从大到小依次为冬季、秋季、春

季、夏季. 4 年间, 冬季、春季 SO_2 、 NO_2 、 CO 的质量浓度、夏季 O_3 的质量浓度均出现下降趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度在 2016—2017 年略有小幅上升. 由图 3, 从月份来看, NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的最高值均出现在 12 月, O_3 质量浓度的最高值出现在 6 月, SO_2 质量浓度的最高值出现在 3 月. 11 月到次年 3 月是采暖期, 承德市属于山地城市, 冬季逆温现象较为明显, 静稳天气多, 不易形成的对流污染物在山谷集聚, 同时受经济条件限制, 承德农村地区及城市周边冬季取暖仍以分散煤炉为主, 烧柴做饭、取暖在承德也广泛存在, 薪柴燃烧不充分, 煤质品质差, 未经脱硫、脱硝处理的烟气低空直接排入环境空气中, 因而导致 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度在冬、春季节相对较高. O_3 质量浓度的月份变化呈现明显完全相反的趋势, 且夏季出现最高值. 在夏季光照和高温条件下, 根据相关研究^[19], 植物排放的有机物在日照条件下很快能与 NO_x 反应生成 O_3 , 特别是植物排放的异戊二烯等, 对于 O_3 的形成具有重要贡献. 承德市海拔相对较高, 夏季太阳辐射强、气温高, 因此夏季 6 月 O_3 的质量浓度出现高值. PM_{10} 质量浓度的最高值出现在 3 月, 为 $134.22 \text{ ug} \cdot \text{m}^{-3}$. 根据相关研究^[20], 沙尘天气造成的扬尘对颗粒物质量浓度贡献超过风速对颗粒物清除作用的贡献时, 气流会从沿途携带大量沙尘粒子, 导致 PM_{10} 的质量浓度明显升高. 承德市地处河北北部, 紧邻内蒙古浑善达克沙地以及辽西地区, 距离风沙源地较近, 春季多大风. 因此承德 PM_{10} 的质量浓度春季相对较高, 可能与沙尘天气的影响有关.

表 2 AQI 及主要大气污染物质量浓度水平								$\text{ug} \cdot \text{m}^{-3}$
年份	统计值	AQI	SO_2	NO_2	CO	O_3	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}
2016	均值	68.35	29.97	32.45	0.90	97.00	24.56	77.30
	实测值	23.00~249.00	6.00~174.00	6.00~85.00	0.20~4.00	7.00~255.00	6.00~125.00	15.00~442.00
2017	均值	70.26	15.61	31.92	0.88	92.35	33.88	81.11
	实测值	21.00~410.00	3.00~59.00	7.00~87.00	0.26~4.00	9.00~257.00	10.00~148.00	21.00~692.00
2018	均值	70.54	12.04	30.31	0.87	93.82	31.37	80.75
	实测值	20.00~317.00	2.00~51.00	6.00~81.00	0.20~3.00	7.00~268.00	8.00~155.00	16.00~417.00
2019	均值	57.75	12.86	30.12	0.80	88.02	28.90	61.54
	实测值	17.00~188.00	5.00~36.00	5.00~70.00	0.23~3.00	8.00~252.00	7.00~125.00	12.00~210.00
4 年平均	均值	68.35	11.29	31.91	0.86	92.79	29.68	75.19
	实测值	17.00~410.00	2.00~59.00	5.00~87.00	0.20~4.00	7.00~268.00	6.00~155.00	12.00~692.00

表 3 承德市大气污染物质量浓度季节平均值							ug · m ⁻³
季节	AQI	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
春	80.27	19.36	29.33	0.72	120.52	29.01	95.20
夏	59.77	14.46	23.08	0.68	128.68	20.98	53.40
秋	61.06	12.84	35.35	0.85	64.72	31.62	71.80
冬	68.06	23.86	37.96	1.24	53.55	39.89	77.97

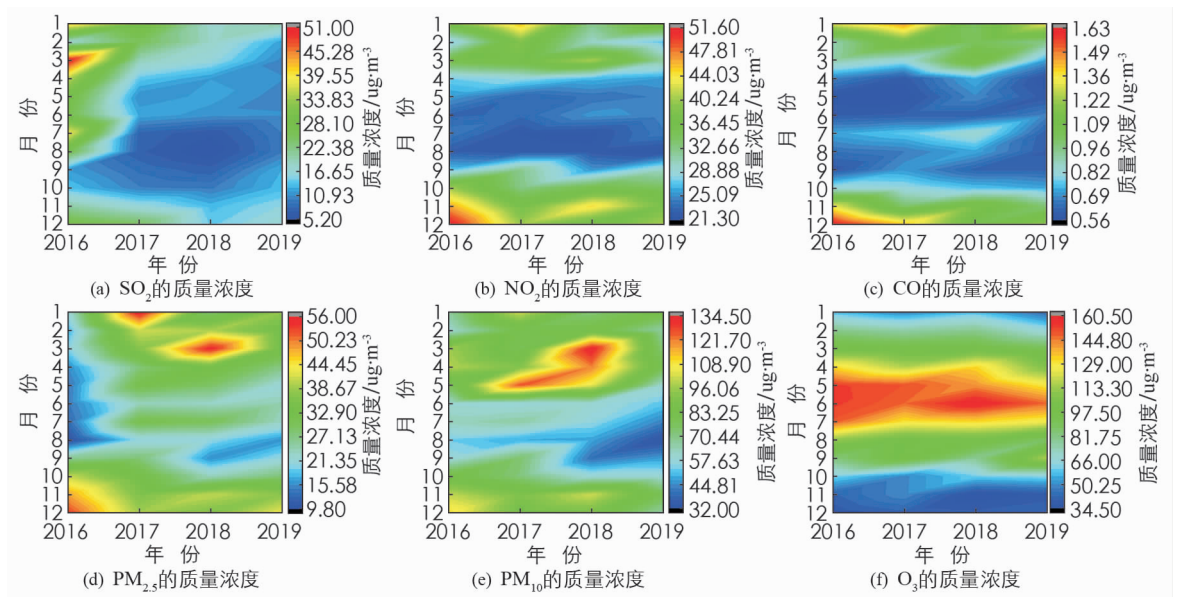


图 3 大气污染物质量浓度的月份变化

2.3 污染物潜在来源解析

2.3.1 AQI 与大气污染物质量浓度的相关分析

大气污染物存在一定的关联, 相关分析表明(表 4): 冬季 AQI 与 SO₂, NO₂, PM₁₀, CO, PM_{2.5} 差异均具有统计学意义, 而与 O₃ 之间差异不具有统计学意义, AQI 与颗粒物之间的相关性最高, 尤其是与 PM₁₀ 相关系数达 0.833, 4 个季节 AQI 与 PM₁₀ 相关系数均达到 0.8 以上, 颗粒物的四季相关性从大到小为秋季、冬季、夏季、春季, 说明颗粒物, 尤其是 PM₁₀, 是全年空气质量的长期影响因素. AQI 与 O₃ 在夏季相关系数达 0.851, 其他季节相关性较低, 说明气温和 O₃ 对承德市空气质量有重要的影响. 从污染物之间的相关性分析来看, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 差异具有统计学意义, 两者具有相同或相似来源. PM_{2.5} 与 NO₂, CO 的相关系数分别为 0.655, 0.687, 差异具有统计学意义, PM_{2.5} 与 NO₂, CO 的相关系数均大于 PM₁₀ 与它们之间的相关系数, 表明气态污染物的排放过程伴随着细颗粒物的产生. 根据相关研究^[21], CO 主要来源于生物燃烧和机动车尾气, NO₂ 主要来源于机动车尾气和工业生产, 这与 PM_{2.5} 来源于机动车尾气、扬尘和生物质燃烧理论一致^[7]. O₃ 与其他 5 种污染物相关性较差, 与 CO, NO₂ 呈显著负相关性, 这符合 NO_x, CO 经光化学反应生成 O₃ 的结论^[22]. SO₂, NO₂, CO 之间差异具有统计学意义, CO 和 SO₂ 是矿物燃料燃烧、工业废气产生的产物, NO₂ 和 CO 由汽车尾气产生, CO 由 SO₂ 和 NO₂ 间接关联, 与其变化相互印证.

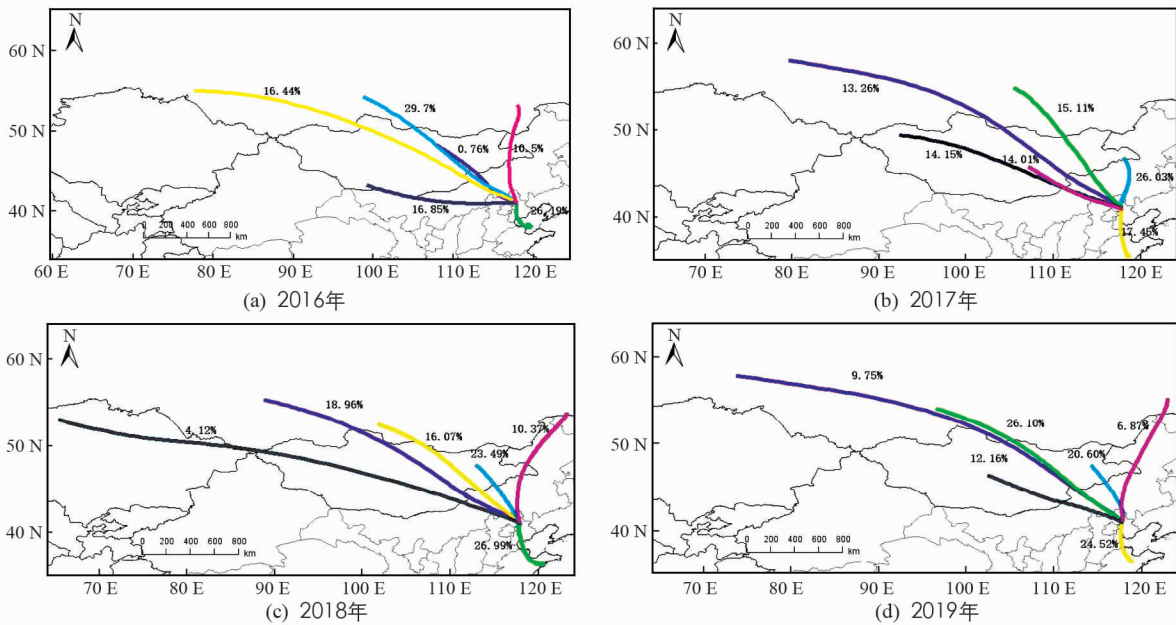
表 4 污染物的相关分析

		AQI	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}
春季	AQI	1.000						
	SO ₂	0.417**	1.000					
	NO ₂	0.469**	0.458**	1.000				
	PM ₁₀	0.816**	0.317**	0.340**	1.000			
	CO	0.513**	0.487**	0.854**	0.407**	1.000		
	O ₃	0.310**	0.136**	0.081	0.132*	0.108*	1.000	
	PM _{2.5}	0.598**	0.036	0.656**	0.644**	0.730**	0.050	1.000
夏季	AQI	1.000						
	SO ₂	0.484**	1.000					
	NO ₂	0.538**	0.265**	1.000				
	PM ₁₀	0.827**	0.481**	0.506**	1.000			
	CO	0.565**	0.296**	0.394**	0.737**	1.000		
	O ₃	0.851**	0.317**	0.466**	0.571**	0.330**	1.000	
	PM _{2.5}	0.445**	-0.214**	0.257**	0.645**	0.686**	0.336**	1.000
秋季	AQI	1.000						
	SO ₂	0.594**	1.000					
	NO ₂	0.803**	0.690**	1.000				
	PM ₁₀	0.884**	0.570**	0.798**	1.000			
	CO	0.807**	0.741**	0.874**	0.833**	1.000		
	O ₃	-0.056	-0.210**	-0.214**	-0.105*	-0.230**	1.000	
	PM _{2.5}	0.804**	0.528**	0.804**	0.872**	0.861**	-0.089	1.000
冬季	AQI	1.000						
	SO ₂	0.628**	1.000					
	NO ₂	0.716**	0.577**	1.000				
	PM ₁₀	0.830**	0.626**	0.791**	1.000			
	CO	0.748**	0.649**	0.912**	0.878**	1.000		
	O ₃	-0.504**	-0.211**	-0.566**	-0.399**	-0.508**	-0.504**	
	PM _{2.5}	0.496**	0.219**	0.530**	0.583**	0.539**	-0.180**	1.000
全年	AQI	1.000						
	SO ₂	0.493**	1.000					
	NO ₂	0.547**	0.454**	1.000				
	PM ₁₀	0.833**	0.419**	0.550**	1.000			
	CO	0.553**	0.524**	0.848**	0.570**	1.000		
	O ₃	0.184**	0.001	-0.325**	0.008	-0.305**	1.000	
	PM _{2.5}	0.574**	0.166**	0.655**	0.650**	0.687**	-0.155**	1.000

注: * 表示 $p=0.05$ 水平差异具有统计学意义; ** 表示 $p=0.01$ 水平差异具有统计学意义.

2.3.2 后向轨迹聚类分析

大气颗粒物污染与空气质量除与本地排放的污染物有关外, 还与远距离大气传输密切相关. 因此利用 TrajStat 软件, 采用总空间方差方法 (TSV), 对 2016—2019 年逐日到达承德市的 5 844 条后向气流轨迹进行聚类分析, 并计算各类轨迹数占总轨迹数的比例^[23]. 气流轨迹的聚类分析表明(图 4), 总体上, 4 年气团虽略有不同但总体变化不大, 污染物输送路径主要包括西北气团、东南气团及北方气团. 西北气团移动路径相对较多, 聚类比例均超过 50%, 其次是北方气团、东南气团. 西北气团主要来自哈萨克斯坦、俄罗斯鄂木斯克、新西伯利亚、蒙古国中西部地区; 东南气团主要来源于山东半岛、渤海湾地区; 北方气团主要来源于蒙古国东部、内蒙古东北部、俄罗斯赤塔和阿穆尔地区. 西北气团运动相对较快, 东南气团运动较慢. 就不同年份而言, 西北气团轨迹数占总轨迹数的比例分别为 62.81%, 56.53%, 62.64%, 68.61%; 东南气团轨迹数占总轨迹数的比例分别为 26.19%, 17.45%, 26.99%, 24.52%; 北方气团轨迹数占据总轨迹数的比例分别为 11.01%, 26.03%, 10.37%, 24.52%. 西北气团是影响承德的主要气团.



注: 该图基于国家地理信息中心标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1667、GS(2016)1593 的标准地图制作绘制, 底图无修改

图 4 2016—2019 年承德市后向轨迹聚类分布

由于地区污染物排放来源分布不均匀, 不同方向的轨迹气团中可能含有不同程度的污染物. 因此, 为分析每类轨迹对应受点(承德市)的大气污染物质量浓度, 将污染物质量浓度数据与 72 h 后向轨迹相匹配后进行聚类分析(见表 5). 总体上来看, 东南气团多种污染物质量浓度均相对较高, 这可能与此气流通路与我国主要大气污染区域华北相连有关. 西北气团下大气污染物的质量浓度次之, PM₁₀ 污染物质量浓度相对较高, 内蒙古高原及蒙古地区的污染源对承德的影响较大, 此区域是我国华北地区重要风沙源. 北方气团大气污染物质量浓度相对较低. 承德市空气污染同时受到近距离(华北地区)排放和远距离(西北地区)传输的影响.

2.3.3 潜在源区及其贡献分析

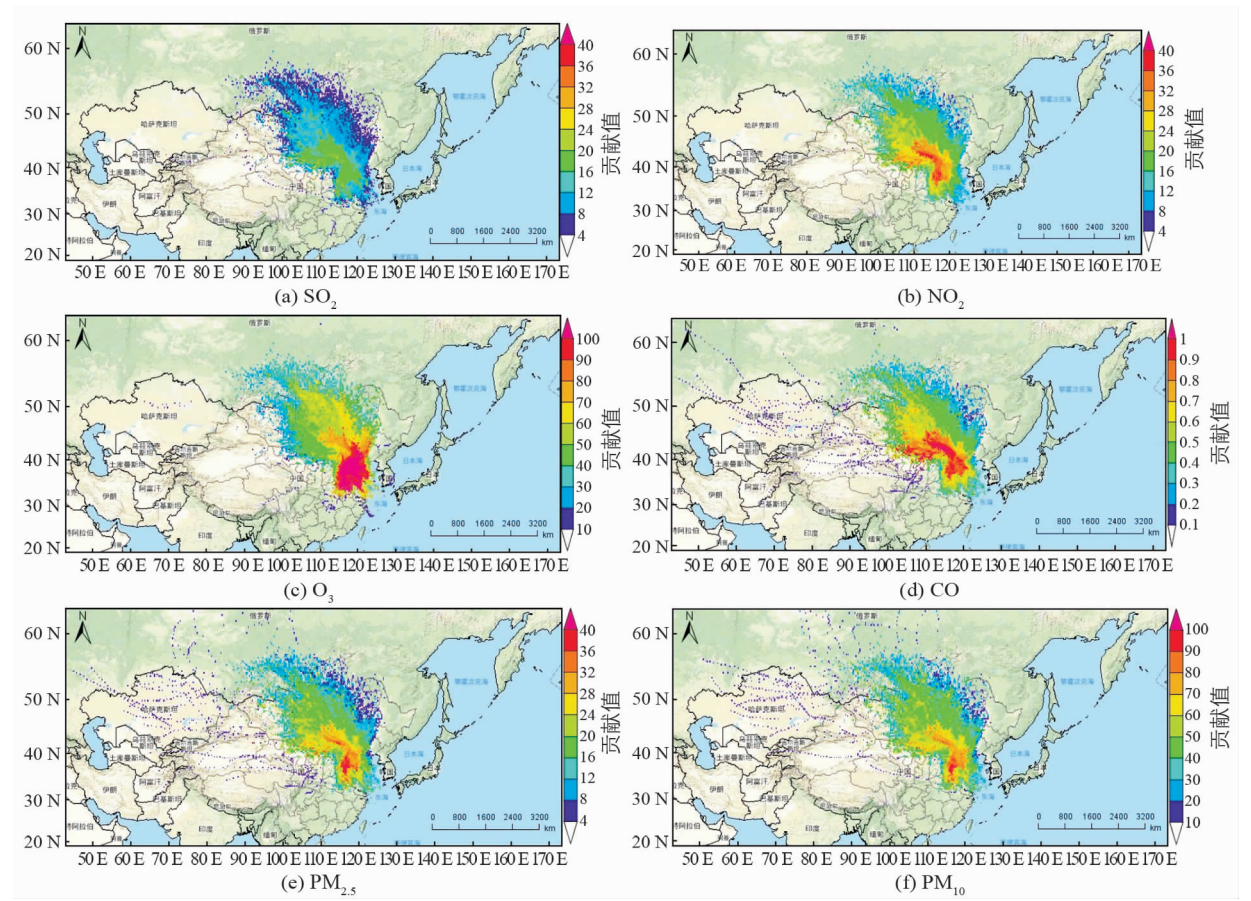
后向轨迹及聚类分析无法识别承德市大气污染物的不同潜在源区的贡献大小. 因此为进一步探究承德市大气污染物潜在来源以及贡献, 本研究开展污染潜在源区分析.

从图 5 可以看出, 污染物潜在源区贡献的较大值主要集中在承德西北部 and 东南部地区, 但不同污染物的潜在源区贡献分布有所不同, O₃ 的潜在源高值区范围最大, NO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5} 的潜在源高值区范围次之, SO₂ 的潜在源高值区范围最小. 潜在源区分布受外来远距离输送的影响较大, 华北平原地区及内蒙古地区等外围地区的 WPSCF 值也较高. 这也说明承德污染物来源复杂, 外源污染物输送是其污染物的重要来源, 其治理难度大. O₃ 东南方向的外围贡献较大; PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的潜在源区及高值区分布类似, 西北及东南方向贡献较大; NO₂, CO 也主要源于西北及东南方向, 但高值区分布方位相对较广; SO₂ 的潜在源区分布比较分散.

WPSCF 只反映潜在源区贡献率大小, 无法直观反映不同潜在源区质量浓度贡献程度. 因此, 为进一步探究潜在污染区污染程度, 采用质量浓度权重轨迹法(WCWT)计算潜在源区的权重质量浓度.

表 5 2016—2019 年承德市 6 类气流后向轨迹和污染物质量浓度特征

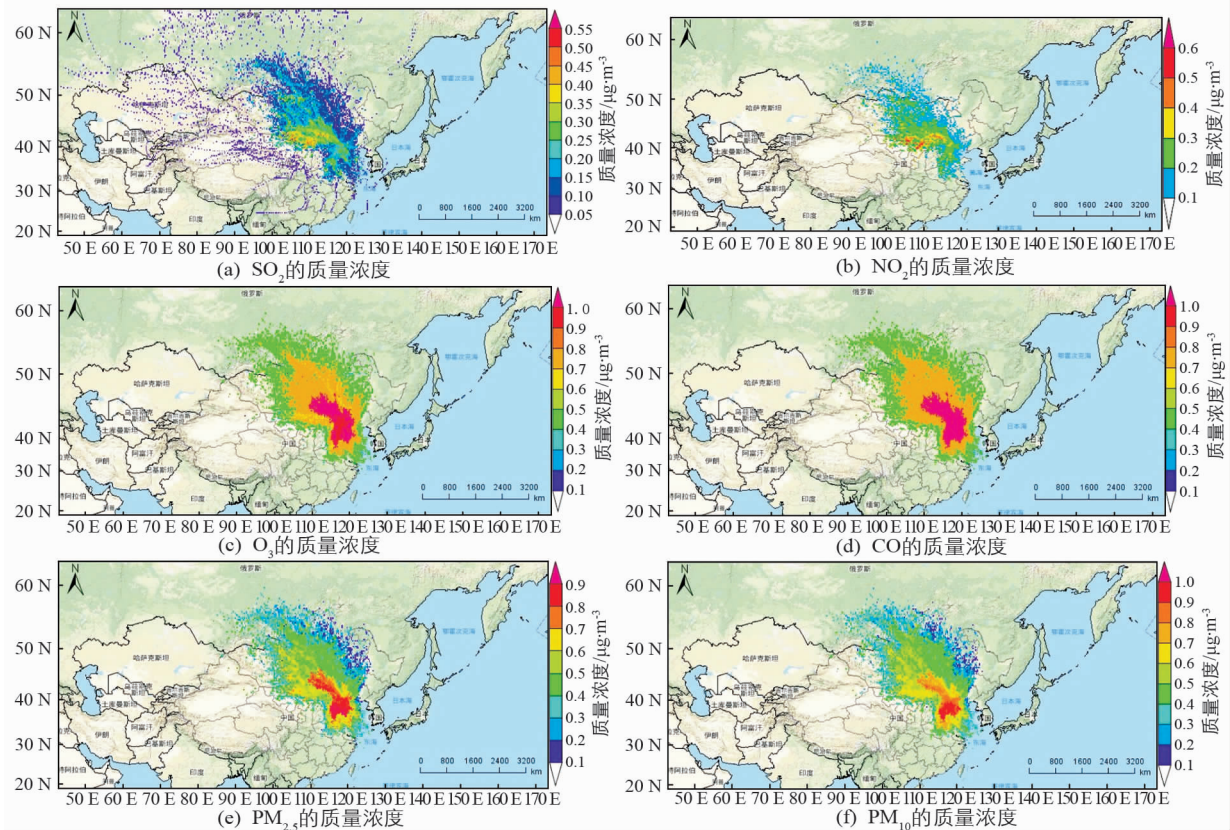
年份	轨迹	占比/%	CO/ ug · m ⁻³	NO ₂ / ug · m ⁻³	PM ₁₀ / ug · m ⁻³	PM _{2.5} / ug · m ⁻³	SO ₂ / ug · m ⁻³	O ₃ / ug · m ⁻³
2019	1	20.60	0.83	36.87	53.88	26.27	15.11	57.08
	2	26.10	0.83	28.84	62.20	29.60	13.18	69.37
	3	9.75	0.87	32.07	73.09	32.42	14.24	66.81
	4	24.52	1.04	41.39	79.98	41.95	14.80	80.68
	5	12.16	1.02	36.21	71.05	34.83	15.65	66.86
	6	6.87	0.47	20.17	36.06	16.64	8.96	86.11
2018	1	18.96	0.89	30.91	94.53	32.79	13.50	68.70
	2	10.37	0.56	21.85	51.56	17.29	7.91	86.78
	3	26.99	0.93	31.05	84.45	36.53	11.05	133.52
	4	16.07	0.84	29.96	71.22	28.80	13.37	70.30
	5	4.12	1.44	44.83	163.24	57.34	19.13	65.19
	6	23.49	0.84	30.76	71.04	28.02	11.76	91.27
2017	1	14.15	1.10	38.04	87.57	38.76	20.11	70.97
	2	17.45	0.89	30.04	89.09	40.04	12.06	138.27
	3	14.01	0.94	34.88	74.99	34.15	18.99	83.56
	4	26.03	0.75	29.19	68.88	28.20	13.21	96.54
	5	13.26	1.02	34.12	105.33	38.68	17.85	67.67
	6	15.11	0.71	28.28	71.55	27.74	14.37	83.73
2016	1	16.85	1.26	42.35	92.94	36.08	35.24	68.25
	2	25.76	0.85	29.88	79.47	22.66	35.84	140.04
	3	16.44	0.86	31.29	77.31	22.41	28.13	82.65
	4	10.50	0.50	22.24	57.93	13.44	19.90	95.71
	5	0.76	0.32	15.67	27.92	9.69	8.21	72.33
	6	29.70	0.90	33.72	74.90	25.17	27.21	85.59



注：该图基于国家地理信息中心标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1667、GS(2016)1593 的标准地图制作绘制，底图无修改

图 5 承德市大气污染物的潜在源区分布

WCWT 结果(图 6)与 WPSCF 结果(图 5)较为相似, WCWT 结果 SO_2 高值区主要分布于西北传输通道的内蒙古中西部地区; NO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 的高值区主要分布于内蒙古中西部地区及东南部的华北平原地区; NO_2 , CO 分布范围较广; O_3 高值区主要分布于东南以石家庄为中心的华北平原地区, 东北辽宁西部地区以及内蒙古地区亦有分布, 高质量浓度贡献区域最广泛. 总体来说西北及东南传输通道是承德市大气外源输入的主要源区. 这与文献[24]中北京地区污染物主要源区来源于内蒙古中西部、华北平原部分地区相符.



注: 该图基于国家地理信息中心标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1667、GS(2016)1593 的标准地图制作绘制, 底图无修改

图 6 承德市大气污染物的质量浓度权重轨迹分布

3 结 论(Conclusions)

- (1) 近 4 年, 承德市环境空气质量有所提高, 优良达标率为 87.29%, 冬、春季节污染相对严重. PM_{10} 为首要污染物的天数最多, 春、秋、冬季均较高. O_3 污染主要出现在夏季, $\text{PM}_{2.5}$ 主要出现在冬季、秋末和初春. 2019 年与 2016 年相比, 空气质量改善明显.
- (2) PM_{10} 是全年空气质量的主要影响因素. 气温是 O_3 污染的重要影响因素. CO 可能主要来源于生物质燃烧和机动车尾气, NO_2 主要来源于机动车尾气和工业生产. $\text{PM}_{2.5}$ 来源于机动车尾气、扬尘和生物质燃烧. CO 和 SO_2 是矿物燃料燃烧、工业废气产生的产物.
- (3) 污染物输送路径主要包括西北气团、东南气团及北方气团. 西北气团移动路径相对较多, 速度最快, 输送距离最长, 其次是北方气团、东南气团. 东南气团多种污染物质量浓度均相对较高. 西北气团下大气污染物的质量浓度次之, 主要表现为 PM_{10} 污染物质量浓度偏高. 北方气团大气污染物质量浓度相对较低.
- (4) 承德市 O_3 的潜在源高值区范围最大, 高贡献区主要分布于东南的华北平原地区. NO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在源高值区范围次之, 高贡献区主要分布于内蒙古中西部地区及东南部的华北平原地区. SO_2 的潜在源高值区范围最小, 分布比较分散. 西北及东南传输通道是承德市大气外源输入的主要源区.

参考文献:

[1] WORLD BANK. Air Pollution Deaths Cost Economies in Middle East and North Africa More Than \$9 Billion. Available.

- http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-economies-in-middle-east-and-northafrica-more-than-9-billion Accessed January 3, 2019.
- [2] WHO 7. Million Premature Deaths Annually Linked to Air Pollution. World Health, Geneva, Switzerland Available. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/> Accessed January 3, 2019.
- [3] JIANG L, HE S X, ZHOU H F. Spatio-temporal Characteristics and Convergence Trends of $PM_{2.5}$ Pollution: A Case Study of Cities of Air Pollution Transmission Channel in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120631.
- [4] SONG C B, WU L, XIE Y C, et al. Air Pollution in China: Status and Spatiotemporal Variations [J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 334-347.
- [5] HU J L, WANG Y G, YING Q, et al. Spatial and Temporal Variability of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China [J]. Atmos. Environ, 2014, 95: 598-609.
- [6] ZHU L, GAN Q M, LIU Y, et al. 2017. The Impact of Foreign Direct Investment on SO_2 , Emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: a Spatial Econometric Analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 189-196.
- [7] 李 敏, 何红弟. 上海市大气环境中 $PM_{2.5}$ 与其他污染物相关性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(10): 127-134.
- [8] 倪 超, 李新江, 向 涛, 等. 重庆涪陵大气污染物特征及其与气象要素的关系 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 123-130.
- [9] XU X, ZHAO T, LIU F, et al. Climate Modulation of the Tibetan Plateau on Haze in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(3): 1365-1375.
- [10] 陈国磊, 周 颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 $PM_{2.5}$ 的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4069-4079.
- [11] DRAXLER R R, HESS G D. An Overview of the Hysplit-4 Modeling System for Trajectories [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.
- [12] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-Based Software that Uses Various Trajectory Statistical Analysis Methods to Identify Potential Sources From Long-Term Air Pollution Measurement Data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(8): 938-939.
- [13] 赵 恒, 王体健, 江 飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源 [J]. 热带气象学报, 2009, 25(2): 181-186.
- [14] LIU B S, BI X H, ZHANG J Y, et al. Insight into the Critical Factors Determining the Particle Number Concentrations During Summer at A Megacity in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 75: 169-180.
- [15] HSU Y K, HOLSEN T M, HOPKE P K. Comparison of Hybrid Receptor Models to Locate PCB Sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(4): 545-562.
- [16] 周 胜, 陈桐生, 黄报远, 等. 2015 和 2018 年承德市区 $PM_{2.5}$ 排放与来源对比分析 [J]. 环境工程, 2019, 37(11): 125-131.
- [17] MARCAZZAN G M, VACCARO S, VALLI G, et al. Characterisation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Particulate Matter in the Ambient Air of Milan (Italy) [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(27): 4639-4650.
- [18] WANG Y, YING Q, HU J, et al. Spatial and Temporal Variations of Six Criteria Air Pollutants in 31 Provincial Capital Cities in China During 2013—2014 [J]. Environment International, 2014, 73(1): 413-422.
- [19] CALFAPIETRA C, MUGNOZZA G S, KARNOSKY D F, et al. Isoprene Emission rates Under Elevated CO_2 and O_3 in Two Field-Grown Aspen Clones Differing in Their Sensitivity to O_3 [J]. New Phytologist, 2018, 179(1): 55-61.
- [20] 刘新春, 钟玉婷, 何 清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地及周边地区 PM_{10} 时空变化特征及影响因素分析 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 323-330.
- [21] 苑 丽, 闫瑞敏. 焦作市大气污染物特征和相关性分析 [J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 114-119.
- [22] RYPDAL K, RIVE N, BERNTSEN T, et al. Climate and Air Quality-Driven Scenarios of Ozone and Aerosol Precursor Abatement [J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(7): 855-869.
- [23] 周 沙, 刘 宁, 刘朝顺. 2013—2015 年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1835-1842.
- [24] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 915-927.