

新疆昌吉市冬季静稳天气综合指数的建立及在预报中的应用

黄秋霞, 李筱艺*, 沙那提, 王春燕, 陶笑笑, 叶尔克江·霍依哈孜, 柳宏英

昌吉州气象局, 新疆 昌吉

收稿日期: 2025年10月12日; 录用日期: 2025年11月12日; 发布日期: 2025年11月20日

摘 要

静稳天气与大气污染的发生、发展有着密切联系, 为定量描述昌吉市冬季大气的静稳程度, 文章综合考虑 $T_{925hPa}-2T$ 、 $T_{850hPa}-2T$ 、850 hPa相对湿度、海平面气压、10 m风速、925 hPa风速、24 h变温、24 h变压等气象因子, 通过历史样本统计划分阈值范围再权重求和构建了静稳天气综合指数, 经过回算实况检验, 分析所建静稳天气综合指数与污染天气的对应关系, 应用到冬季重污染天气成因分析和空气质量预报方面。结果表明: (1) 静稳天气综合指数可以综合反映大气静稳程度, 与 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关性较好; (2) 静稳天气综合指数可用于判断昌吉市冬季重度污染及以上天气的成因; (3) 静稳天气综合指数对空气质量预报有很好的指导作用, 可提高短期和中期的预报质量。

关键词

静稳天气综合指数, $PM_{2.5}$ 质量浓度, 相对湿度, 污染天气

Establishment of Winter Stable Weather Comprehensive Index in Changji, Xinjiang and Its Application in Forecasting

Qiuxia Huang, Xiaoyi Li*, Shanati, Chunyan Wang, Xiaoxiao Tao, Yeerkejiang·Huoyihazi, Hongying Liu

Changji Meteorological Bureau, Changji Xinjiang

Received: October 12, 2025; accepted: November 12, 2025; published: November 20, 2025

*通讯作者。

文章引用: 黄秋霞, 李筱艺, 沙那提, 王春燕, 陶笑笑, 叶尔克江·霍依哈孜, 柳宏英. 新疆昌吉市冬季静稳天气综合指数的建立及在预报中的应用[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1341-1348. DOI: [10.12677/ccrl.2025.146134](https://doi.org/10.12677/ccrl.2025.146134)

Abstract

The stable weather is closely related to the occurrence and development of air pollution. In order to quantitatively describe the stable stability of the atmosphere in winter of Changji City, this paper comprehensively considers the meteorological factors such as $T_{925\text{hPa}-2T}$ 、 $T_{850\text{hPa}-2T}$ 、850 hPa relative humidity, sea level pressure, 10m wind speed, 925 hPa wind speed, 24-hour variable temperature and 24-hour variable pressure, divides the threshold range through historical sample statistics, and then calculates the weight to construct the static weather comprehensive index. Through the back calculation and actual test, the corresponding relationship between the static and stable weather index and the polluted weather is analyzed, which is applied to the cause analysis of heavy pollution weather in winter and air quality prediction. The results show that: (1) The stable weather index can comprehensively reflect the atmospheric static stability, which is similar to $\text{PM}_{2.5}$; (2) The stable weather index can be used to judge the causes of severe pollution and above weather in winter of Changji; (3) The stable weather index has a good guiding effect on air quality prediction and can improve the quality of short-term and medium-term prediction.

Keywords

Static and Stable Weather Comprehensive Index, $\text{PM}_{2.5}$ Mass Concentration, Relative Humidity, Polluted Weather

Copyright © 2025 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

随着我国经济的快速发展,城市建设和交通现代化进程加快,京津冀、长三角、珠三角、东北辽东地区、四川盆地、兰州盆地、天山北麓的乌鲁木齐等城市和城市群区域大气污染问题日趋严重[1][2]。静稳天气形势下平均风速较小,阴雾天气居多,极易造成污染物的聚集,当发生静稳天气时,在高低空有利气象要素的共同作用下,会导致气溶胶和水汽在近地层不断积累,从而形成高污染和低能见度天气[3]-[5]。冬季受冷高压控制,配合下沉气流有利于霾天气的形成[6],雾、霾形成和维持的主要机理是边界层逆温、地面弱风场和底层湿度的增大[7]-[9]。运动及湍流强度和边界层高度的日变化是造成污染物浓度时空变化的主要原因[5],大气污染物可以通过平流运动跨区域输送,本地排放源和周边区域的输送共同造成当地的大气污染现象[10]-[12]。静稳天气背景、本地污染源强度和外来污染物运输是造成当地大气污染和霾天气形成的重要原因[13]。目前城市空气污染预报业务中,静稳天气的判断主要为预报员对天气形势的主观分析,急需研发客观定量的静稳天气综合指数用于描述气象条件是否有利于形成重污染天气。有关学者已经开展了大量的研究,如朱蓉[14]、杨元琴等[15]开发了空气污染潜势指数和空气质量气象条件参数指数;张恒德[4][13]、陆忠艳等人[16]构建了静稳天气综合指数并应用到预报业务和评估中。

近年来有关学者针对天山北麓的乌鲁木齐等城市和城市群区域大气污染成因开展了大量研究,但主要集中在乌鲁木齐地区的大气污染特征[17]、源解析和综合治理效果评估等方面[18][19]。李霞[20][21]、赵克明等[22]研究发现乌鲁木齐一年四季均会出现焚风,冬季频率最多,发生焚风时,当地上空稳定气团被分离为上下两层,在市区形成“微型锋面”和辐合带,造成污染物集聚。王敬等[23]对乌鲁木齐重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征和来源进行了研究,城市扬尘、煤烟尘和二次粒子是乌鲁木齐大气重污染期间环境空

气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要贡献源类。钟玉婷等[24]对乌鲁木齐冬季黑碳气溶胶浓度变化进行分析,并利用气流后向轨迹进行了来源分析,表明乌鲁木齐本地源排放与来自周边城市群污染物输送的叠加促使污染加重。

昌吉州作为新疆率先发展的重点城市,是工业发展的重点区域,火力发电、铝冶炼、煤炭开发等高耗能、高污染、高排放等行业较多,导致大气污染物排放量相对较大,环境问题已经成为制约社会可持续发展的重要因素。文章尝试建立适用于昌吉市的静稳天气综合指数,使其可以客观反映气象条件对空气污染的作用,又可用于日常环境气象预报业务中,更好的提升预报业务水平。

2. 资料和方法

文章使用的大气环境数据来源于昌吉州生态环境局提供的昌吉市 2017 年 1 月 1 日~2021 年 12 月 31 日逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据、空气状况等,用于判断昌吉市空气污染状况。

气象资料采用预报员日常业务工作中易获取的欧洲中期天气预报中心(简称 ECMWF)的全球数值模式细网格预报产品,高空要素分辨率为 $0.25\text{ km} \times 0.25\text{ km}$,地面要素分辨率为 $0.125\text{ km} \times 0.125\text{ km}$,均采用再分析资料的初值数据,选取距离昌吉市城区最近的格点共计 29 种气象资料的初始数据。

样本资料时间长度取 2017 年 1 月 1 日~2021 年 12 月 31 日冬季共 451 d,经剔除缺测值后样本数为 337 d,占原样本数的 75%。

本研究采用相关性分析、阈值统计、回算检验等统计方法,结合预报经验、文献调查等方式进行构建静稳天气综合指数。

3. 静稳天气综合指数的构建

3.1. 污染天气和非污染天气的界定

文章采用昌吉州生态环境局经质控后提供的大气环境空气质量指数数据,来界定是否为污染日。大环境空气质量指数是按照《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)对各种污染物的浓度值换算,得出最终的空气质量指数,根据限制界定可得出大环境控制状况。

3.2. 气象因子的挑选

文章在挑选合适的气象因子时,采用读取的 29 种气象要素值分别与昌吉市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行相关性分析,结合预报经验、文献调查等方式,文章为静稳天气综合指数构建选取了相关性好、物理意义明确、方便获取和计算的 8 种气象因子,分别是: $T_{925\text{hPa}}-2T$ 、 $T_{850\text{hPa}}-2T$ 、850 hPa 相对湿度、海平面气压、10 m 风速、925 hPa 风速、24 h 变温、24 h 变压。

3.3. 气象因子阈值确定

统计 8 种气象因素数据样本中所有轻度污染及以上的污染天气中各气象要素在不同阈值范围内的分布频率,按照频率分布特点,将频率集中的阈值范围平均划分多段,不集中的频率分布范围划为一段,以便剔除极端值对计算结果带来的影响[13]。经过划分后,确保了各区间有充分的样本分布,见表 1。

Table 1. Meteorological factors and corresponding sub-indices for the stable weather composite index in Changji City
表 1. 昌吉市静稳天气综合指数构建所选气象因子及其对应分指数

$T_{925\text{hPa}}-2T$ ($^{\circ}\text{C}$)	分指数	$T_{850\text{hPa}}-2T$ ($^{\circ}\text{C}$)	分指数	850 hPa 相对 湿度(%)	分指数	海平面气压 (hPa)	分指数
<-1	0.6891	<-2	0.6599	<25	1.2074	<1025	0.9252

续表

$-1 \leq T_{925\text{hPa}} - 2T < 1$	0.9457	$-2 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 0$	0.9160	$25 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 35	1.0553	$1025 \leq$ 海平 面气压 < 1030	0.9493
$1 \leq T_{925\text{hPa}} - 2T < 3$	1.0270	$0 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 2$	0.7687	$35 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 45	1.1128	$1030 \leq$ 海平 面气压 < 1035	1.0580
$3 \leq T_{925\text{hPa}} - 2T < 5$	1.0058	$2 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 4$	1.0825	$45 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 55	0.9715	$1035 \leq$ 海平 面气压 < 1045	1.0358
$5 \leq T_{925\text{hPa}} - 2T < 7$	1.1312	$4 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 6$	1.0862	$55 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 65	0.9775	≥ 1045	1.0149
≥ 7	1.1566	$6 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 8$	1.1471	$65 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 75	0.8440		
		$8 \leq T_{850\text{hPa}} - 2T < 10$	1.1312	$75 \leq 850 \text{ hPa}$ 相对湿度 < 85	0.9160		
		≥ 10	1.1936	≥ 85	0.9045		
10 m 风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	分指数	925 hPa 风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	分指数	24 h 变压 (hPa)	分指数	24 h 变温 ($^{\circ}\text{C}$)	分指数
<2	1.1805	<2	1.1269	<-5	1.0042	<-2	0.9691
$2 \leq 10 \text{ m}$ 风速 < 4	0.9555	$2 \leq 925 \text{ hPa}$ 风速 < 4	1.0153	$-5 \leq 24 \text{ h}$ 变压 < 0	1.0778	$-2 \leq 24 \text{ h}$ 变温 < 0	0.9368
≥ 4	0.6939	$4 \leq 925 \text{ hPa}$ 风速 < 6	0.7973	$0 \leq 24 \text{ h}$ 变压 < 5	1.0901	$0 \leq 24 \text{ h}$ 变温 < 2	1.0270
		≥ 6	0.7633	$5 \leq 24 \text{ h}$ 变压 < 10	0.7435	$2 \leq 24 \text{ h}$ 变温 < 4	1.0734
				≥ 10	0.5143	≥ 4	1.0409

3.4. 气象因子分指数的计算

通过计算不同阈值区间内, 污染天气出现概率相比气候态概率的倍数作为各要素阈值区间的分指数, 分指数越大表明污染天气出现的概率越大[13]。计算方法如下:

$$K_{in} = \frac{\frac{a_{in}}{a_{in} + b_{in}}}{\frac{a}{a + b}} \quad (1)$$

式中, K_{in} 为变量 i 在区间 n 的分指数, a_{in} 和 b_{in} 为变量 i 在区间 n 的条件下样本中污染天气和非污染天气出现次数, a 和 b 分别为样本中污染天气和非污染天气出现的总次数。此方法已有相关学者进行了可行性的确定[4], 并且《空气污染扩散气象条件等级》(QX/T413-2018K)中也采用过此公式的算法, 确保了计

算方法的可行性。

3.5. 计算静稳天气综合指数

采用上述数据和计算方法，统计了昌吉市改为 2017 年~2021 年冬季 8 种气象因子在不同阈值范围内所对应的分指数，对 8 种气象要素的分指数进行求和，得出最终的静稳天气综合指数(见表 2)，反映大气综合扩散条件。

4. 结果检验及应用

4.1. 静稳天气综合指数与 PM_{2.5} 质量浓度的相关性

根据上述计算静稳天气综合指数的方法，文章回算了昌吉市 2017 年~2021 年冬季的逐日静稳天气综合指数，通过与 PM_{2.5} 质量浓度进行相关性分析，相关系数为 0.33，既所得出的静稳天气综合指数具有很好的代表性，可以反映昌吉市近年来静稳天气状况。

4.2. 静稳天气综合指数在空气质量预报中的应用

根据 PM_{2.5} 为首要污染物时的空气质量分级标准，将 PM_{2.5} 日均浓度进行分级，挑选同一阈值范围内的静稳天气综合指数，统计静稳天气综合指数的平均值、最大值和最小值，结果见表 2。

Table 2. Composite index and thresholds for stable weather in Changji City
表 2. 昌吉市静稳天气综合指数、阈值

污染等级	指数平均值	指数最大值	指数最小值	阈值
优	7.249569	7.958378	6.111264	7.7
良	7.679015	8.426212	6.273871	
轻度污染	8.001508	8.848098	6.744986	
中度污染	8.210239	8.949605	7.327941	
重度污染	8.249272	8.828585	7.27354	
严重污染	8.344765	8.791779	7.605523	

由表 2 可以看出，静稳天气综合指数越大越容易出现污染天气，且污染等级越高。冬季的静稳天气综合指数在轻度污染时为 8.0，以计算出的轻度污染时的静稳天综合指数平均值再次判断所有样本是否出现污染，并计算利用轻度污染时的静稳天气综合指数判断是否污染的准确性，通过调整其值增大预报的准确率，最终确定阈值为 7.7，准确率为 78.93%。

在冬季，静稳天气综合指数 = 7.7 作为判断昌吉市污染天气是否出现的阈值。依据业务常用的 ECMWF 模式预报气象要素，可以得到静稳天气综合指数预报值，并作为一种数值预报产品应用到业务中。当静稳天气综合指数数值出现转折变化时，可以提示空气质量的转折变化时间。以 2021 年 12 月 1~9 日、13~17 日、12~24 日出现的污染天气过程为例(图 1)。2021 年 12 月 2~9 日出现轻度至中度污染、13~17 日出现轻度污染、21~24 日由中度污染至重度污染随后转为轻度污染的过程。实况回算静稳天综合指数和 PM_{2.5} 质量浓度呈现出一致的变化趋势：1~9 日、13~17 日和 21~24 日空气持续为轻度及以上污染，对应的静稳天综合指数持续大于 7.7 的阈值，10~12 日、18~20 日、25~26 日 PM_{2.5} 质量浓度下降，对应的静稳天综合指数下降至 7.7 或在 7.7 附近。

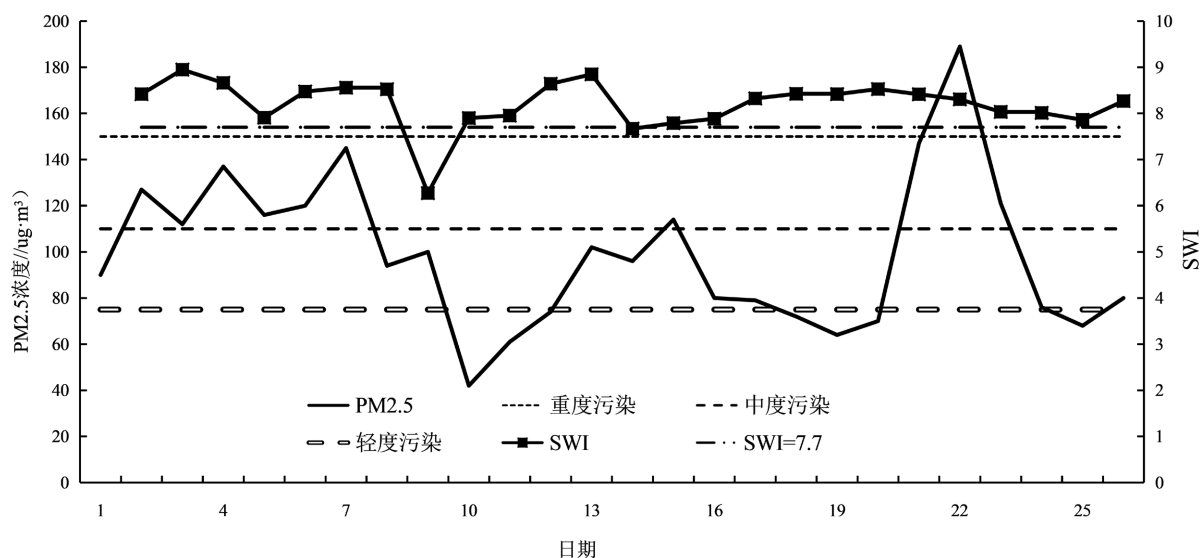


Figure 1. PM_{2.5} mass concentration and retrospective analysis in Changji City from December 1 to 26, 2021
图 1. 2021 年 12 月 1~26 日昌吉市 PM_{2.5} 质量浓度和实况回算

以上分析表明, 静稳天综合指数预报可反映此次污染过程的特征, 静稳天综合指数的预报, 直接表征的是静稳气象条件的变化, 在进行污染天气预报时, 应结合实际污染排放源的变化情况综合分析, 并综合考虑污染物的聚集效应造成的滞后现象。

4.3. 静稳天气综合指数对重污染天气成因的判断

参照表 2, 以静稳天气综合指数 = 7.7 作为判断昌吉市冬季静稳天气出现的阈值, 当静稳天气综合指数 < 7.7 时, 空气质量一般不易出现污染天气; 当出现严重污染天气时, 样本中静稳天气综合指数应该大于 7.7。通过统计样本中重度及以上污染天气时的静稳天气综合指数发现, 样本中静稳天气综合指数 > 7.7 的共 119 d, 占 93.7%, 剩下的 8 d 占 6.3%。

进一步对静稳天气综合指数 > 7.7, 且未出现重度及以上污染天气的 6 d (剔除前后数据缺失不连贯的日期后) 共 4 次污染过程进行天气学背景分析, 结合静稳天气综合指数变化情况指示污染天气过程中气象扩散条件演变过程, 进一步判断重污染天气成因。

Table 3. Analysis of four heavy pollution episodes in Changji City: The synoptic background
表 3. 昌吉市 4 次重度及以上污染过程天气背景分析

日期	PM _{2.5} (ug·m ⁻³)	静稳天气 综合指数	前期演变	天气背景分析
2017-2-13 2017-2-14	119 261	7.61 7.51	2 月 1~12 日静稳天气综合指数持续 > 7.7, 均为轻度及以上污染等级, 9~11 达重度污染, 12 日为中度污染, 13~16 日严重转重度污染, 17~18 日为重度污染, 19 日空气质量为优。	2 月 1~12 日高空为稳定的新疆脊控制, 地面处于蒙古高压低后部, 污染物持续积累。13~14 日低槽分裂短波过境, 地面高压侵入, 冷空气较弱, 不断分类短波过境, 19 日冷空气完全过境, 风力增大。

续表

2018-1-14 2018-1-15	210 178	7.64 7.63	1 月 8~13 日静稳天气综合指数持续 > 7.7, 均为重度和严重污染等级, 其中 11~13 日为严重污染, 16 日升为良, 指数为 7.3。	1 月 8~11 日处于稳定的新疆脊控制, 地面为蒙古高压低后部偏东气流, 冷空气持续积累; 12~16 日不断有弱短波过境, 处于地面高压前, 冷空气侵入。
2020-12-07	204	7.6	12 月 3~6 日为重度污染, 指数为 8.1~8.4, 9 日为严重污染, 指数为 8.2, 污染持续, 10~11 日降为重度污染。	12 月 3~6 日处于稳定的新疆脊控制, 地面为高压低后部, 7~8 日为平直偏西气流转西北气流, 有弱冷空气侵入, 后期仍为西北气流影响。
2020-12-27	204	7.27	12 月 23~26 日为重度污染, 指数为 8.2~8.8, 29 日转为中度污染, 30 日为良, 指数有所下降。	12 月 23~26 日高空处于平直西风气流, 指数为 8.2~8.8, 27~28 日转为西北气流, 冷空气侵入, 指数降为 7.2~7.8, 地面为高压低后部, 30 日转为良。

研究表明, 重污染发生时的天气形势有静稳天气形势下的本地积累型、上游污染输送型、本地静稳积累和上游污染输送叠加型[25]-[27]。通过表 3 对 4 次重度及以上污染过程污染状况演变和天气背景进行分析后可知, 均为静稳天气形势下的本地积累型向清洁空气转换的过渡。主要表现为前期静稳天气形势下污染物不断积累, 污染状况达重度或以上污染, 当高空有冷槽过境和地面高压侵入后, 风向转为西北风或西风, 风力增大, 污染扩散条件好转。但冬季冷空气若是较弱, 空气质量反而下降, 需要不断有冷空气扰动或强冷空气入侵才可以打破本地污染天气过程。对照静稳天气综合指数与 PM_{2.5} 质量浓度, 可以发现前期静稳天气形势下污染物积累较多, 当冷空气入侵后, 静稳天气综合指数有所下降, 会出现指数值小于 7.7 的现象, 但空气状况仍为重度污染, 滞后于静稳天气综合指数的现象。

5. 结论

- 通过对昌吉市 2017 年~2021 年冬季静稳天气综合指数的构建, 并进行回算和检验后, 得出:
- (1) 静稳天气综合指数可以综合反映大气静稳程度, 与 PM_{2.5} 质量浓度相关性较好, 静稳天气综合指数越大越容易出现污染天气, 但 PM_{2.5} 质量浓度变化滞后于静稳天气综合指数的变化。
 - (2) 静稳天气综合指数对空气质量预报有很好的指导作用, 可提高短期和中期的预报质量。利用 ECMWF 模式预报气象要素, 可以得到未来 7 d 静稳天气综合指数预报值, 当静稳天气综合指数数值出现转折变化时, 可以提示空气质量的转折变化时间, 作为一种数值预报产品应用到业务中。
 - (3) 静稳天气综合指数可用于判断昌吉市冬季重度污染及以上天气的成因。以静稳天气综合指数 7.7 作为判断昌吉市冬季静稳天气出现的阈值, 当静稳天气综合指数 < 7.7 时, 空气质量一般不易出现污染天气; 当出现严重污染天气时, 样本中经静稳天气综合指数应该大于 7.7。若是出现静稳天气综合指数小于 7.7 仍出现重度及以上污染等级时, 可结合天气过程强度、静稳天气综合指数变化情况判断重污染发生天气形势。

基金项目

昌吉回族自治州科技项目资助(2020S03、2023S02-07); 昌吉回族自治州气象局科技项目资助(CJ202308、CJ202412)共同资助。

参考文献

- [1] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略考虑[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 353-363.
- [2] 王楠, 李霞, 李淑婷, 等. 乌鲁木齐冬末一次伴随焚风的重污染天气过程探测研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(3): 43-52.
- [3] 李明明, 王雁, 闫世明, 等. 太原市静稳天气综合指数构建研究[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集(一). 太原: 山西省气象科学研究所, 2021: 550-555.
- [4] 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. 气象, 2017, 43(8): 998-1004.
- [5] 王颖, 梁依玲, 王丽霞. 气象条件对污染物浓度分布影响的研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(2): 69-74.
- [6] 翁之梅, 李丽平, 杨万裕, 等. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征[J]. 气象, 2016, 42(2): 183-191.
- [7] 张敏, 蔡子颖, 韩素芹. 天津静稳指数建立及在环境气象预报和评估中的应用[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 4453-4460.
- [8] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 801-808.
- [9] 孙兆彬, 李梓铭, 廖晓农, 等. 北京大气热力和动力结构对污染物运输和扩散条件的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1693-1705.
- [10] 陆琛莉, 李海军, 张雪慧, 等. 2013 年 12 月浙北北部两次重度霾过程的对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 47-55.
- [11] 王喜全, 杨婷, 王自发, 等. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 690-696.
- [12] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014 年 2 月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4340-4351.
- [13] 陈懿妮, 罗玲, 马昊, 等. 杭州市静稳天气指数构建及应用研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4461-4469.
- [14] 朱蓉, 徐大海, 孟燕君, 等. 城市空气污染数值预报系统 CAPPS 及其应用[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 267-278.
- [15] 杨元琴, 王继志, 侯青, 等. 北京夏季空气质量的气象指数预报[J]. 应用气象学报, 2009, 20(6): 649-655.
- [16] 陆忠艳, 王扬锋, 蒋大凯, 等. 基于气象条件的沈阳空气质量预报方法研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 68-74.
- [17] 巩庆, 范金霞, 林卫, 等. 2014-2015 年新疆库尔勒市空气质量的时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 77-82.
- [18] 李军, 吕爱华, 李建刚. “十一五”时期乌鲁木齐市大气污染特征及影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2): 14-20.
- [19] 张效军. 资源利用造成环境负效应的经济损失估算-以乌鲁木齐大气污染为例[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2003.
- [20] 李霞, 王磊, 任泉. 乌鲁木齐风廓线雷达探测能力评估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 9-18.
- [21] 李霞, 贾健. 复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 1-10.
- [22] 赵克明, 李霞, 孙鸣婧, 等. 乌鲁木齐冬季浅薄型焚风对大气扩散条件及空气质量的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 13-20.
- [23] 王敬, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 乌鲁木齐市重污染期间 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(2): 113-119.
- [24] 钟玉婷, 刘新春, 何清, 等. 乌鲁木齐冬季黑碳气溶胶污染特征初步研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(6): 36-40.
- [25] 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 133-148.
- [26] 徐建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4303-4314.
- [27] 俞布, 朱彬, 窦晶晶, 等. 杭州地区污染天气型及冷锋输送清除特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 452-459.