

1971—2015 年乌兰察布市霾日数时空变化规律及其影响因素

谢子扬^{1,2,3},白艳萍⁴,何中声^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学 林学院,福建 福州 350002;2. 福建农林大学 海峡自然保护区研究中心,福建 福州 350002;
3. 生态与资源统计福建省高校重点实验室,福建 福州 350002;4. 内蒙古自治区乌兰察布市气象局,内蒙古 乌兰察布 012000)

摘 要:研究乌兰察布地区霾日数的时空分布及其影响因素,对乌兰察布市(乌市)及其上下游地区雾霾形成机理和跨境输送机制的研究提供理论参考。采用乌兰察布市(乌市)1971—2015 年 11 个台站气象数据资料,结合 2015 年环境污染数据资料,分析乌市长时间序列霾日数时空分布、突变情况、周期尺度变化和形成因素。结果表明,乌市霾日数在长时间序列中呈“减小—消失—增加”的 U 型变化趋势,主要集中在 1971—1981 年和 2014—2015 年 2 个时间段,1971 年发生了显著突变。在空间上主要集中在东南、西南和中部,其中兴和县霾日数远高于其他区县。霾日数的 3 个尺度周期强度都有减弱趋势,以 3~6 a 为主的小尺度周期自 1982 年消失后,于 2014 年重新出现。霾日数季节分布由春季转变为秋、冬季,这是由于雾霾成因发生了变化,霾的成因从以沙尘天气为主的自然源转变为以 PM_{2.5} 等空气污染为主的人为排放源。

关键词:乌兰察布市;年霾日数;Mann-kendall 突变检验;Morlet 小波分析;影响因素;PM_{2.5}

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)04-0011-07

Spatiotemporal Variation of Haze Days and the Influencing Factors in Ulanqab,
Inner Mongolia from 1971 to 2015

XIE Zi-yang^{1,2,3},BAI Yan-ping⁴,HE Zhong-sheng^{1,2,3*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. Cross-Strait Nature Reserve Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, Fujian, China;
4. Ulanqab Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Ulanqab 012000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The objectives of this study were to investigate the spatiotemporal distribution of haze days and the influencing factors, and to provide theoretical reference for the study of the haze formation mechanism and cross-border transport mechanism in Ulanqab and its upstream and downstream areas. Using meteorological data from 11 stations in Ulanqab from 1971—2015, combined with environmental pollution data from 2015, we analyzed the spatiotemporal and distribution of haze days in time series, abrupt situations, periodic scale changes and formation factors. The results showed that the number of haze days in Ulanqab showed a U-shaped trend of “decreasing-disappearing-increasing” in the long time series, mainly concentrated in the time periods of 1971—1981 and 2014—2015, with a significantly sudden change in 1971. Spatially, the haze days were mainly concentrated in the southeast, southwest and central regions, with Xinghe County having a much higher number of haze days than other counties. The intensity of all three scale cycles of haze days tended to weaken, and the small-scale cycle dominated by 3—6 years reappeared in 2014 after disappearing since 1982. The seasonal distribution of haze days shifted from spring to autumn and

收稿日期:2020-08-25 修回日期:2021-05-06
基金项目:福建农林大学 A 类博士毕业生启动经费(KXML2008A)。
作者简介:谢子扬。研究方向:森林气候、森林资源经营与管理。E-mail:nmgxzy94@126.com
* 通信作者:何中声,博士,讲师。研究方向:森林气候、生物多样性等。E-mail:jxhzs85@fafu.edu.cn

winter, which was due to a change in the causes of haze from natural sources, mainly dusty weather, to anthropogenic emission sources, mainly $PM_{2.5}$ and other air pollutions.

Key words: Ulanqab; annual haze day; Mann-kendall mutation test; Morlet wavelet analysis; influencing factor; $PM_{2.5}$

霾是一种造成视程障碍的天气现象,是大量极细微干尘粒等均匀地浮游在空中,使空气浑浊,常在气团稳定、空气干燥的天气条件下出现^[1]。霾的组成按来源分为:自然源和人类活动排放源^[2]。国外学者曾在南亚上空发现气溶胶组成的棕色云团,并开展研究^[3]。霾的定义经历了不同时期发展^[4-6],我国古代霾的记载多与沙尘相关^[7]。改革开放后,霾来源发生变化,多为人类活动排放源^[2],物质组成也发生较大改变^[8-9]。形成灰霾天气的自然源和人类活动排放源所产生的物理、化学污染物会对健康产生损害^[10-12]。针对日益严重的霾污染,国家相继出台雾霾防治及大气治理政策与法规^[13-14]。众多学者从不同角度对灰霾现象进行研究:灰霾现象与颗粒物的关系^[15]、 $PM_{2.5}$ 区域传输特征^[16]、雾-霾与大气湿度关系^[17]、雾霾天气预测^[18]、海冰对重霾天气形成作用^[19]、季风对空气污染促进和净化作用^[20]等。目前,我国年霾日数在地理上呈“东多西少”特征,霾污染严重区域主要分布于长江中下游、华南和华北地区^[21-23]。

乌兰察布市简称“乌市”,地处内蒙古自治区中部、华北地区北部,下辖 1 区、1 市、4 旗、5 县,东南部紧邻京津冀地区^[24]。全市被阴山山脉横贯,其特殊的地理地形,导致全市常年风力偏大,自然源的灰霾天气长期出现率较低。然而,随着社会经济发展,城市扩张加快,乌市工业污染物排放增多、机动车数量增加,导致空气污染现象增多^[25]。研究表明,霾污染会通过冷空气跨境输送和气溶胶-边界层反馈在 2 个不同城市群间产生物理和化学联系^[26]。乌市由于其所在的特殊地形和地理位置,是内蒙古高原与华北平原重要的连接枢纽,也是京津冀乃至华北地区重要的生态屏障和通风廊道,因此,开展乌市雾霾研究对该地上下游地区空气污染的防控与治理具有重要意义。近年出现乌市空气污染物短时间序列的研究,但关于乌市霾污染长期时空分布研究尚未报道。为此,通过对乌市 1971—2015 年霾日发生的时空特征、影响因素、突变情况与周期变化情况进行研究,探究乌市雾霾现象发生规律,旨在填补乌市霾污染研究空缺,为华北地区大气污染防治、环境保护和灰霾天气形成机制等研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据资料

气象资料来源于乌市气象局,选取乌市 11 个区

县气象站监测数据(霾日数、扬沙日数、沙尘暴日数、浮尘日数、大风日数、相对湿度、日照时数、能见度等气象要素逐月、逐年数据)。近 5 a 内乌市各区县霾日数观测由传统人工观测升级为机器观测,考虑到观测方式差异和保证数据精确性和一致性,研究采用 1971—2015 年人工观测霾数据。能见度数据选取 1980—2015 年,期间个别区县数据缺失,在计算全市能见度 ≤ 10 km 出现频率(百分率)的加权平均值时剔除缺失值。

环境污染数据资料来源于中国空气质量在线监测分析平台(www.aqistudy.cn)和乌市生态环境局公布的《乌兰察布市空气质量月报》,由于环境污染数据最早公开日期为 2015 年,所以数据选取时间段为 2015 年 1—12 月,统计指标为 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO、 NO_2 、 O_3 和每月空气质量超标日数比例。

1.2 研究方法

采用 Excel 软件绘制相关图表;采用 SPSS21.0 软件对乌市年霾日数与其他气象要素、空气污染指标进行 Pearson 相关性双尾检验;根据 Arcgis 软件绘制乌市地势与气象站分布图(图 1),采用反距离权重插值法绘制 1971—2015 年乌市平均年霾日数空间分布图(图 4);根据 Matlab 2017 软件对乌市年霾日数进行非参数 Mann-kendall 突变检验法对长时间序列的霾日数进行检验,探究乌市霾日数长期是否曾发生明显突变以及突变情况,使用复值 Morlet 小波对霾日数进行分析发生周期特征并预测后续变化。

1.2.1 霾日数距平值百分率 距平值百分率是表示某时间段某气象要素较常年值偏多或偏少的指标之一^[27],霾日数距平值百分率可以直观反映每年霾日数变化情况,见式(1)、式(2):

$$d_i = \frac{d - \bar{d}}{\bar{d}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, d_i 为霾日数距平百分率(%); d 为某时段霾日数; \bar{d} 为计算时段同期霾日数(d)。

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2)$$

式中, d_i 为某时段霾日数(d); n 为年数, $i=1,2,3,\dots,n$ 。

1.2.2 反距离权重插值法 空间插值可以实现用

已知样点数据来估算未知点数据,使数据在空间上实现可视化的效果^[28]。反距离权重法(inverse distance weighted, IDW)广泛应用空气污染因子监测、气象因子监测领域^[29]。国外有研究在对空气污染物进行评估时使用多种插值法进行论证,结果表明 IDW 效果最好,在监测站点较少 IDW 效果更优^[30],研究采用反距离权重插值法对年霾日数进行地图可视化分析。

1.2.3 非参数 Mann-Kendall 突变检验法 气候突变是普遍存在于气候系统中一种重要现象,是指气候从一种稳定态(或稳定持续变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)过程,它表现为气候在时空上从一个统计特征到另一个统计特征的急剧变化^[31]。非参数 Mann-Kendall 突变检验法是一种检测气候突变的方法,其优点是不需要样本遵从一定分布,也不受少数异常值干扰,人为干扰较少,更适用于顺序变量^[32]。研究中年霾日数在长时间序列中存在急剧变化现象,故采用该方法分析。在 Mann-Kendall 突变检验法中,UF 代表年霾日数顺统计量序列曲线,UB 代表年霾日数时数逆统计量序列曲线。当 $UF>0$,统计量序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。当统计量序列曲线超过临界值时,表示呈上升或下降趋势显著。若统计曲线在临界值之间出现交点,则交点对应时间就是

开始突变的时间^[33]。

1.2.4 复值 Morlet 小波分析法 小波分析不仅可计算气候序列变化的尺度,还可显示变化时间位置,对气候预测具有重要意义^[32]。复值 Morlet 小波的实部可以检测不同时间尺度上周期性变化^[34]。复值 Morlet 小波的实部显示信号强度和相位^[32,35]。由于乌市数据时间跨度较长,研究选用 Morlet 小波实部分析法对全市年霾日数不同时间尺度周期进行分析并预测后续变化。在复值 Morlet 小波实部图中,可观察到不同时间尺度上存在周期振荡,信号强弱用颜色冷暖来表示,颜色冷暖与信号强弱呈正比,小波系数在零处表示突变点^[36]。

2 结果与分析

2.1 霾日数时间变化趋势

1971—2015 年,乌市霾日数 5 a 滑动平均值在 1971—1982 年呈大幅度波动下降趋势,1982—2013 年偶尔有小幅度波动但总体趋于 0,2014—2015 年大幅度增加(图 1)。其中乌市平均年霾日数正距平有 10 a,负距平有 35 a,正距平主要集中在 20 世纪 70 年代和 2015 年,其中 1971—1973 年距平百分率值最高,之后年份霾日数距平百分率值下降,1979—2014 年距平百分率为负数,2015 年距平百分率急剧增加,数值由负数转为正数。

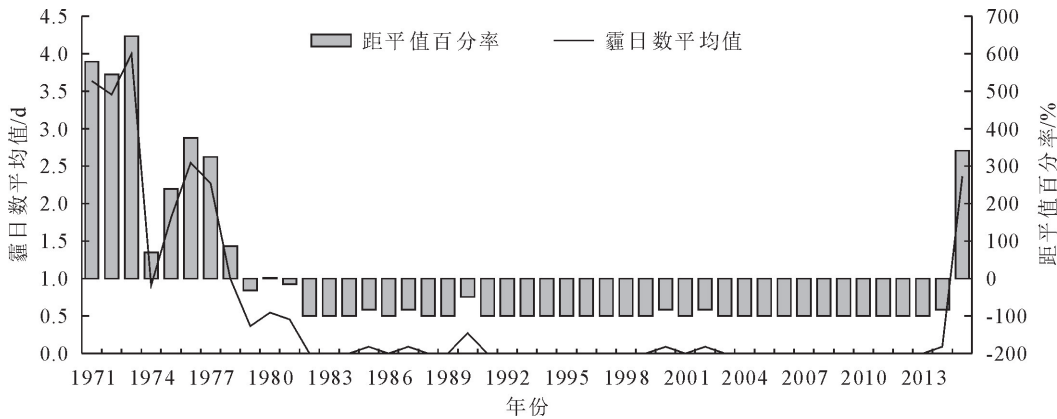


图 1 1971—2015 年乌市霾日数距平值百分率时间序列

Fig. 1 Time series of the percentage of haze days anomalies value in Ulanqab from 1971 to 2015

对比 1971—2015 年乌市年霾日数与其他气象要素的相关性分析表明(表 1),年霾日数与浮尘、扬沙、能见度 ≤ 10 km 频率、沙尘暴、大风、雾呈现显著的正相关关系,其中霾与浮尘的关系为极强相关,与扬沙、能见度 ≤ 10 km 频率、沙尘暴的关系为强相关,与大风、雾的关系为中等程度相关。沙尘天气涵盖了浮尘、扬沙和沙尘暴 3 种天气现象,因此乌市雾霾的成因与沙尘天气有关。

乌市 1971—2015 年四季霾日数 5 a 滑动平均值

在不同时间段呈显著差别(图 2a),1971—1981 年春季霾日数数值最高,且远高于其他季节,并呈降低趋势;2014—2015 年秋、冬季数值最高,且有上升趋势。从四季霾日数距平百分率(图 2b)来看,1971—1981 年霾日数四季距平百分率普遍为正数且数值偏高,而 2013 年以后秋、冬季节距平百分率急剧上升。

1971—1981 年霾日数集中在春季(图 2a),且春季霾日数呈下降趋势;而 2014—2015 年霾日数呈显著上升趋势,且集中在秋、冬季。有研究表明,乌市

2015 年空气污染物中 $PM_{2.5}$ 含量较高、首要污染物为 $PM_{2.5}$ 污染天数为 61 d,主要发生在秋、冬季^[37]。为此,对 2015 年霾日数月数据与空气污染数据进行

相关性分析(表 2),结果表明 2015 年霾日数与 $PM_{2.5}$ 浓度、空气超标日数比例呈显著正相关关系,表明 2015 年霾日数增加主要与 $PM_{2.5}$ 污染有关。

表 1 1971—2015 年霾日数与其他气象要素 Pearson 线性相关性检验

	年扬沙 日数	年浮尘 日数	年能见度 ≤ 10 km 发生频率	年大风 日数	年沙尘暴 日数	年雾 日数	年平均 相对湿度
Pearson 相关系数	0.793 **	0.876 **	0.681 **	0.587 **	0.628 **	0.391 **	0.150
显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.327
N	45	45	36	45	45	45	45

注: ** 表示相关性在 0.01 以上显著(双尾检验), * 表示相关性在 0.05 以上显著(双尾检验)。Pearson 相关系数 0.8~1.0 极强相关; 0.6~0.8 强相关; 0.4~0.6 中等程度相关; 0.2~0.4 弱相关; 0.0~0.2 极弱相关或无相关。N 表示年份数。

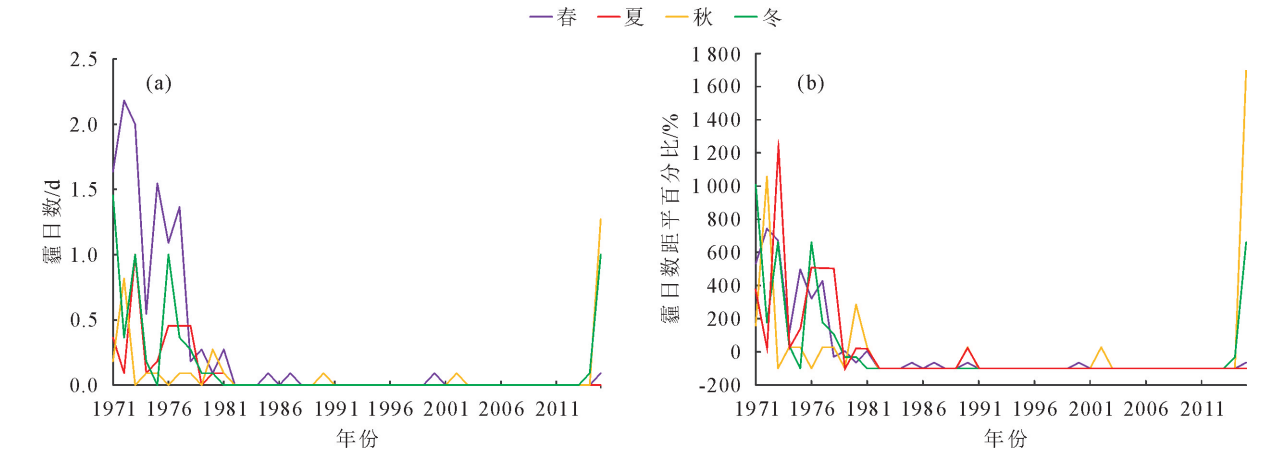


图 2 1971—2015 年乌市四季霾日数(a)距平值百分率(b)与 5 a 滑动平均值时间序列

Fig. 2 The time series of the number of haze days in the four seasons in Ulanqab from 1971 to 2015 (a) the percentage of anomalies value and (b) the 5-year moving average values

表 2 2015 年霾日数月数据与环境污染指标 Pearson 线性相关性检验

	AQI	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3	空气质量超标 日数比例
Pearson 相关系数	0.643 *	0.781 **	0.373	0.445	0.541	0.701 *	-0.673 *	0.786 **
显著性	0.024	0.003	0.233	0.147	0.069	0.011	0.016	0.002
N	12	12	12	12	12	12	12	12

2.2 霾日数空间分布特征

采用反距离加权插值法对全市 1971—2015 年霾日数平均值进行空间插值(图 3)。乌市年霾日数除了兴和县以外,都介于 0~1,其中察右前旗、察右后旗、四子王旗、商都县、化德县和丰镇市年霾日数在全市中最低,数值均 <0.260 d,而兴和县年霾日数远高于其他区县年霾日数平均值和全市平均值。霾日数与扬沙、浮尘、沙尘暴等沙尘天气日数的相关性较强(表 1)。根据沙尘天气发生日数与霾日数距平百分率分析(图 4),1971—1981 年乌市霾日数与沙尘天气日数距平百分率波动幅度类似,表明这期间霾日数与沙尘类天气日数关联性较强;2013 年以后霾日数距平百分率大幅度增加,沙尘类天气波动幅度不大,其中沙尘暴、浮尘发生日数呈降低趋势,表明乌市霾日数与沙尘类天气日数关联性较弱。

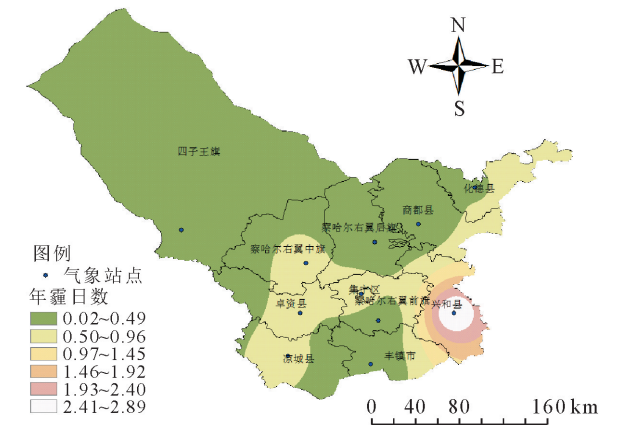


图 3 1971—2015 年乌市平均年霾日数地理分布

Fig. 3 Geographical distributions of average annual haze days in Ulanqab from 1971 to 2015

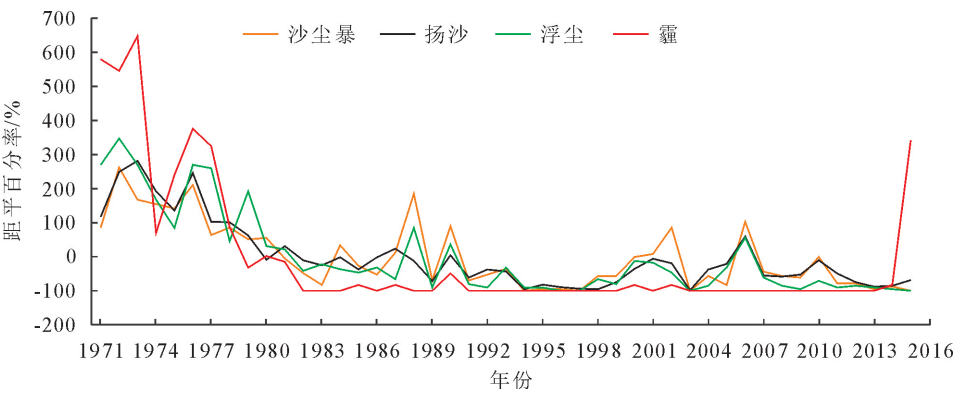


图 4 1971—2015 年乌市沙尘天气与霾日数距平百分率变化趋势

Fig. 4 Trend chart of the percentage change of sand dust weather and haze days in Ulanqab from 1971 to 2015

2.3 霾日数突变检验

根据 Manner-Kendall 突变检验曲线(图 5),UF 与 UB 曲线于 1971 年在临界区域出现交点,1973 年 UF 与 UB 曲线非常接近但未相交,1973 年以后 UF 曲线呈低频波动降低至 2013 年触底,随后回升。年霾日数在 1971 年发生显著突变,顺统计量序列曲线经过短期波动后呈减小趋势,2013—2015 年开始增加。

2.4 霾日数周期变化趋势

采用复值 Morlet 小波对乌市 1971—2015 年霾日数序列进行连续小波变换,得到小波变化系数实部等值线图(图 6)。乌市年霾日数 Morlet 小波图存在 3 组不同尺度的周期性震荡,分别是 3~6 a 小尺度周期(a 的单位为年)、10~20 a 中尺度周期、25~40 a 大尺度周期。中、大尺度周期闭合中心最为明显,10~20 a 中尺度周期具有全域性,正负相位交替出现,呈现“高低高低高”趋势;大尺度 20~35 a 呈现“高低高”趋势。所有尺度随着时间推移,稳定

性减弱。小尺度中心在 1982 年以后消亡,在 2014 年以后重新出现。3 个不同尺度周期变化均有信号强度减弱趋势。

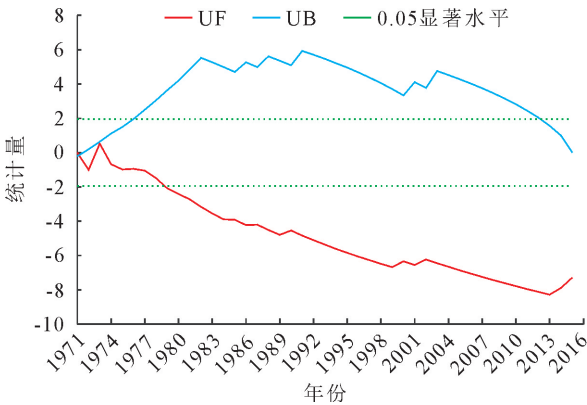


图 5 1971—2015 年乌市年霾日数 Manner-Kendall-突变检验曲线

Fig. 5 Manner-Kendall-abrupt change test curve of annual haze days in Ulanqab from 1971 to 2015

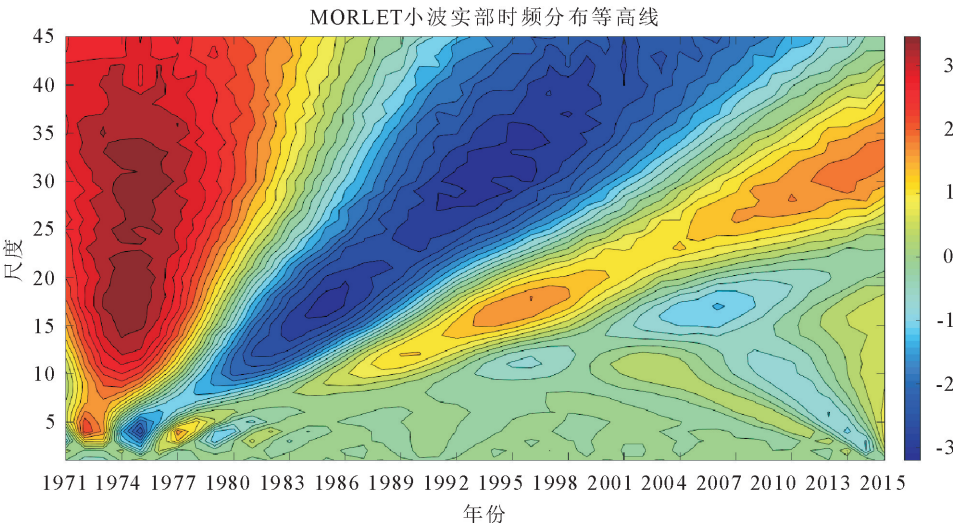


图 6 1971—2015 年乌市年霾日数 Morlet 小波实部时频分布等高图

Fig. 6 Contour map of real-time time-frequency distribution of Morlet wavelet in annual haze days inUlanqab from 1971 to 2015

3 结论与讨论

乌市 1971—2015 年霾日数在空间上主要集中在该市东南部、中部、西南部,其中兴和县霾日数远高于其他区县。在时间上主要集中在 1971—1981 年与 2014—2015 年时间段,通过对比这 2 个时间段,1971—1981 年霾日数主要集中在沙尘暴频发的春季,这一时期霾日数与沙尘类天气发生日数距平百分率都具有数值较高、波动趋势相近的特点,且霾日数与沙尘天气在 Pearson 相关性检验中表现出极显著相关性,表明这时期霾的成因主要与沙尘天气有关;2014—2015 年沙尘类天气发生日数较少,距平百分率也表现出疲软降低趋势,而霾日数距平百分率在这一时间段内急剧升高,同时以 3~6 a 为周期的霾日数小波周期在这一时段内有恢复的可能性,霾日数发生的季节从沙尘天气频发的春季在这一时期转变为秋、冬季,表明这一时期霾成因沙尘类天气关系不大,与多年来城市生态修复、植树造林,促使森林覆盖率提升,年均极大风速降低有关;2015 年霾日数与空气超标日数比例、PM_{2.5} 呈现显著相关性,这一时期霾日数成因与 PM_{2.5} 为主的空气污染物有关。近年来,乌市工业和交通业发展迅速,人为排放源在秋、冬供暖季产生大量颗粒物,以及长期以来风力降低,对霾天气的生成和维持提供了有利条件。影响当前霾的成因在长时间序列由自然源转化为以 PM_{2.5} 空气污染物为主要污染物的人为排放源。

乌市雾霾成因在长时间序列上的改变,该地区大风日数与沙尘类天气发生日数也在降低,而大风也具有驱散雾霾天气的作用。乌市位于内蒙古中部,是西伯利亚冷空气和蒙古气旋进入华北地区的“门户”之一^[38],也是京津冀地区重要的通风廊道。乌市大风日数的降低,是否间接影响到相邻京津冀地区风力的流通与平均风速,为华北地区部分重工业城市灰霾天气的维持创造气象条件,是未来研究的方向。

参考文献:

[1] 中国气象局. 地面气象观测规范-天气现象[S]. 2017.

[2] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.

WU D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2): 257-269. (in Chinese)

[3] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, MITRA A P, *et al.* The indian ocean experiment and the asian brown cloud[J]. Current Science, 2002, 83(8): 947-955.

[4] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.

WU D. A discussion on difference between haze and fog and

warning of ash haze weather[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(4): 3-7. (in Chinese)

[5] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-15.

WU D. More discussions on the differences between haze and fog in city[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(4): 9-15. (in Chinese)

[6] 伍永学, 吴兑. 霾的观测标准(规范)历史沿革与修订建议[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10): 206-212.

WU Y X, WU D. Historical evolution and revised proposals of observation standards (norms) of haze[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(10): 206-212. (in Chinese)

[7] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. 科学通报, 1982, 27(5): 294-297.

[8] WU D, TIE X, DENG X. Chemical characterizations of soluble aerosols in southern China[J]. Chemosphere, 2006, 64(5): 749-757.

[9] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.

ZHANG X Y, SUN J Y, WANG Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187. (in Chinese)

[10] 白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 198-201.

BAI Z P, CAI B B, DONG H Y, *et al.* Adverse health effects caused by dust haze——a review[J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(3): 198-201. (in Chinese)

[11] 陈仁杰, 阚海东. 雾霾污染与人体健康[J]. 自然杂志, 2013, 35(5): 342-344.

CHEN R J, HAN H D. Haze/Fog and human health: a literature review[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(5): 342-344. (in Chinese)

[12] 钟南山. 慢性阻塞性肺疾病在中国[J]. 中国实用内科杂志, 2011, 31(5): 321-322.

ZHONG N S. Chronic obstructive pulmonary disease in China [J]. Chinese Journal of Practical Internal Medicine, 2011, 31(5): 321-322. (in Chinese)

[13] 魏巍贤, 马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 6-14.

WEI W X, MA X L. Optimal policy for energy structure adjustment and haze governance in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 6-14. (in Chinese)

[14] 薛金枝, 朱庚富. 中日大气污染控制法规比较及建议[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(11): 101-103.

[15] 余锡刚, 吴建, 郗颖, 等. 灰霾天气与大气颗粒物的相关性研究综述[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(2): 86-88.

YU X G, WU J, LI Y, *et al.* Study progress on the correlation of atmospheric haze and particulates[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(2): 86-88. (in Chinese)

[16] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1361-1368.

XUE W B, FU F, WANG J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China [J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1361-1368. (in Chinese)

[17] 丁一汇, 柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与

大气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):37-48.

[18] 张浩,石春娥,杨元建. 基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究[J]. 气象,2019,45(3):407-414.

ZHANG H,SHI C E,YANG Y J. Prediction of winter haze days in Anhui Province based on East Asian winter monsoon index[J]. Meteorological Monthly,2019,45(3):407-414. (in Chinese)

[19] 陈诚,牛涛,陆尔. 喀拉海和巴伦支海海冰对中高纬异常纬向环流暨中国东部重霾天气形成的作用[J]. 大气科学学报,2019,42(2):267-279.

CHEN C,NIU T,LU E. Effect of ice in the Barents-Kara Seas on zonal circulation over mid- high latitudes and severe haze events in eastern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2019,42(2):267-279. (in Chinese)

[20] LELIEVELD J,BOURTSOUKIDIS E,BRÜHL C,*et al.* The South Asian monsoon——pollution pump and purifier[J]. Science,2018,361(6399):270-273.

[21] 高歌. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报,2008,63(7):761-768.

GAO G. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961—2005[J]. Acta Geographica Sinica,2008,63(7):761-768. (in Chinese)

[22] 都彦廷,张冬有. 大兴安岭地区 2001—2019 年地表温度时空分布及影响因素分析[J]. 森林工程,2020,36(6):9-18.

[23] 宋连春,高荣,李莹,等. 1961—2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J]. 气候变化研究进展,2013,9(5):313-318.

SONG L C,GAO R,LI Y,*et al.* Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961—2012[J]. Climate Change Research,2013,9(5):313-318. (in Chinese)

[24] 李红瑛,薛羽,曹二佳,等. 近 50 年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(12):145-151.

LI H Y,XUE Y,CAO E J,*et al.* Spatiotemporal variation characteristics of water deficit in Ulanqab during the latest 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2019,33(12):145-151. (in Chinese)

[25] 杨志捷,刘烨焜,韩理. 内蒙古乌兰察布市集宁区 O₃ 污染特征及影响因子[J]. 干旱气象,2019,37(4):631-638.

YANG Z J,LIU Y K,HAN L. Analysis of O₃ pollution characteristics and influencing factors in Jining district of Ulanqab of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology,2019,37(4):631-638. (in Chinese)

[26] HUANG X,DING A,WANG Z,*et al.* Amplified transboundary transport of haze by aerosol - boundary layer interaction in China[J]. Nature Geoscience,2020,13(6):428-434.

[27] 吴英杰,李玮,王文君,等. 基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J]. 干旱区研究,2019,36(4):943-952.

WU Y J,LI W,WANG W J,*et al.* Drought characteristics in Inner Mongolia based on precipitation anomaly percentage [J]. Arid Zone Research,2019,36(4):943-952. (in Chinese)

[28] 马轩龙,李春娥,陈全功. 基于 GIS 的气象要素空间插值方法研究[J]. 草业科学,2008,25(11):13-19.

MA X L,LI C E,CHEN Q G. Study on the method of GIS based spatial interpolation of climate factors in China[J]. Pratacultural Science,2008,25(11):13-19. (in Chinese)

[29] 晏星,马小龙,赵文慧. 基于不同插值方法的 PM₁₀ 污染物浓度研究[J]. 测绘,2010,33(4):172-175.

YAN X,MA X L,ZHAO W H. Research on the PM₁₀ pollutant concentration based on different interpolation method [J]. Surveying and Mapping,2010,33(4):172-175. (in Chinese)

[30] WU J,M WINER A,J DELFINO R. Exposure assessment of particulate matter air pollution before, during, and after the 2003 Southern California wildfires[J]. Atmospheric Environment,2006,40(18):3333-3348.

[31] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.

FU Z B,WANG Q. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1992,16(4):482-493. (in Chinese)

[32] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.

[33] 黄菊梅,赖顶梅,向涛,等. 1960—2012 年洞庭湖区日照时数的变化特征及影响因素[J]. 生态学杂志,2014,33(3):755-760.

HUANG J M,LAI D M,XIANG T,*et al.* Variation characteristics of sunshine duration and its impact factors in Dongting Lake area during 1960—2012[J]. Chinese Journal of Ecology,2014,33(3):755-760. (in Chinese)

[34] 郝春沣,贾仰文,龚家国,等. 海河流域近 50 年气候变化特征及规律分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2010,8(1):39-43.

HAO C F,JIA Y W,GONG J G,*et al.* Analysis on characteristics and rules of climate change of Haihe river basin in recent 50 years[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2010,8(1):39-43. (in Chinese)

[35] ZHANG M,HE J,WANG B,*et al.* Extreme drought changes in Southwest China from 1960 to 2009[J]. Journal of Geographical Sciences,2013,23(1):3-16.

[36] 姜萍,徐洁,陈鹏翔,等. 南疆近 57 年沙尘暴变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(2):103-109.

JIANG P,XU J,CHEN P X,*et al.* The variation characteristics of sandstorms in South Xinjiang during recent 57 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2019,33(2):103-109. (in Chinese)

[37] 刘焯焜,李朋,李海燕,等. 近三年乌兰察布市空气污染气象条件分析[J]. 资源节约与环保,2019(6):37-38.

[38] CHEN L,TAN B,GUNNAR K N,*et al.* Wintertime cyclone/ anticyclone activity over China and its relation to upper tropospheric jets[J]. Tellus A,2014,66(1):21889.