

袁瑞瑞,王建英,张卫红,等.不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律[J].中国沙漠,2024,44(1): 209-217.

不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律

袁瑞瑞^{1,2,3},王建英^{1,2,3},张卫红⁴,张肃诏^{1,2,5},王坤^{1,2,3},雍佳^{1,2,3}

(1.中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,宁夏银川750002;2.宁夏气象防灾减灾重点实验室,宁夏银川750002;3.宁夏气象服务中心,宁夏银川750002;4.宁夏回族自治区生态环境监测中心,宁夏银川750002;5.宁夏气象台,宁夏银川750002)

摘要:为探究不同路径冷空气影响下宁夏沙尘重污染天气的特征及传输规律,利用环境和气象数据及NCEP再分析资料,在对宁夏逐日地面环流分型的基础上,总结了易造成宁夏沙尘重污染天气的环流特征,基于后向轨迹模式,分析了不同路径冷空气影响下的沙尘重污染天气特征及污染来源和贡献率。结果表明:(1)较易造成全区沙尘重污染天气的冷空气路径和环流型为偏西路径型(A、AN、ANW)、西北路径型(AE、ANE、N、NE)和偏北路径型(CE、CSE、E)。(2)偏西路径冷空气影响下,中卫市一般最先出现沙尘重污染;西北路径冷空气影响下,中卫市和石嘴山市最先出现沙尘重污染;偏北路径冷空气影响下,石嘴山市最先出现沙尘重污染。(3)偏西和西北路径冷空气影响下,宁夏沙尘传输轨迹以偏西和西北方向为主,沙尘源地主要来自额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠,沙源地对PM₁₀质量浓度的贡献分别为80~160 μg·m⁻³和>160 μg·m⁻³;偏北路径冷空气影响下的沙尘传输轨迹以西北和东北方向为主,腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地对PM₁₀质量浓度的贡献大于140 μg·m⁻³,其中偏东方向的毛乌素沙地对PM₁₀质量浓度的贡献大于160 μg·m⁻³。

关键词:沙尘重污染;环流分型;传输规律

文章编号:1000-694X(2024)01-209-09

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00146

中图分类号:P425.55

文献标志码:A

0 引言

中国北方春季多发沙尘天气,包含扬沙、浮尘和沙尘暴,当出现沙尘天气时,大气中可吸入颗粒物PM₁₀的浓度急剧增加,环境空气质量明显降低^[1]。高浓度的PM₁₀污染引起的低能见度天气不仅影响交通,还对大气环境、人体健康等构成较大威胁,严重影响正常的生产生活^[2-3]。因此,沙尘及其造成的污染天气持续受到学者们的广泛关注^[4-6]。

沙尘污染天气除了受大风造成的本地扬尘影响外,还受大尺度天气环流背景下冷空气活动造成的沙尘传输影响,一些典型的高低空环流形势容易引起持续性重污染天气^[7-8]。因此,识别典型的污染

天气形势,分析不同天气形势下的污染传输特征,对于沙尘重污染天气机理研究和污染天气的预报预警具有重要意义^[9-10]。近年来,利用客观算法识别典型污染天气型的方法被诸多学者广泛应用。陈龙等^[11]基于Lamb-Jenkinson环流分型法分析了武汉市地面环流形势与污染物浓度之间的关系,发现造成PM₁₀浓度超标的环流型主要为A、AE、E、SE、ANE及NE型;杨旭等^[12]采用PCT客观天气分型方法对京津冀海平面气压场进行分型,认为冷锋前部、高压场、鞍型场、高压后部等类型容易产生污染天气。研究也表明,不同沙尘天气过程中沙尘颗粒物源区、输送路径和贡献存在差异,利用拉格朗日轨迹扩散模型(HYSPLIT)、潜在源贡献因子分析

收稿日期:2023-05-11;改回日期:2023-10-18

资助项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03006);宁夏回族自治区生态环境厅重大研究课题“边界层逆温对银川都市圈PM_{2.5}污染的影响及大气环境监测评估技术研究”;中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室项目(CAMT-202303)

作者简介:袁瑞瑞(1996—),女,宁夏固原人,硕士,助理工程师,主要从事环境气象服务方面的研究。E-mail: yuanrr_818@163.com

通信作者:王建英(E-mail: jianying916@163.com)

(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)等方法,可以直观了解气流或粒子的运动轨迹,结合污染观测数据识别污染物潜在源区和计算相对贡献^[13],在开展大气颗粒物输送轨迹和来源的定量研究方面应用广泛^[14]。目前,已有不少学者从天气背景、形成机理、输送路径等方面对宁夏沙尘及其造成的重污染天气开展了研究。陈豫英等^[15-16]、谭志强等^[17]开展了宁夏沙尘天气的热力动力机制研究,提高了沙尘天气精细化预报预警能力,刘玉兰等^[18]、严晓瑜等^[19]探讨了影响银川市颗粒物质量浓度的主要气流轨迹,而对不同路径冷空气影响下宁夏沙尘重污染天气时空分布特征及污染来源和贡献大小的综合性分析研究较少。

宁夏位于西北地区东部,从西侧、北侧至东侧,被腾格里沙漠、乌兰布和沙漠及毛乌素沙地相围,由于其特殊的地理位置,遇大风天气时极易起沙,造成的沙尘污染天气严重影响环境空气质量,给公众健康造成极大影响。本研究运用Lamb-Jenkinson环流分型方法,总结造成宁夏沙尘重污染天气的环流特征,并选取典型个例,对比不同路径冷空气影响下宁夏沙尘重污染天气的时空分布特征;进一步利用后向轨迹模型,探讨不同路径冷空气影响下的沙尘传输路径及污染来源和贡献率。研究结果将有助于提高宁夏沙尘及其造成的重污染天气落区预报预警准确率,为气象和环保部门重污染天气联合预警提供技术支撑。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

空气质量监测数据来源于宁夏回族自治区环境监测站,分别为五地市2018—2021年逐日PM₁₀质量浓度、空气质量指数(AQI)及首要污染物资料,空气质量指数是定量描述空气质量状况的无量纲指数,0~50为优,51~100为良,101~150轻度污染,151~200中度污染,201~300重度污染,>300为严重污染。环流分型所用的大气环流资料为美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的全球海平面气压场逐日再分析资料。沙尘污染输送及潜在源区分析所用的气象资料为NCEP提供的全球资料同化系统(GDAS)数据,时间分辨

率为6 h(00:00、06:00、12:00、18:00,单位为UTC),空间分辨率为1°×1°。

1.2 方法

1.2.1 环流分型

目前天气分型的主要方法有主观分型和客观分型,主观分型法较为直观,且容易解释物理意义,但分型结果因人而异,依赖于主观经验,客观分型法可以更准确、客观地给出研究地区相应时段的分型结果^[20]。Lamb-Jenkinson环流分型法是一种将主、客观结合起来的客观环流分型方法,既克服了主观性缺点,又有明确的天气学意义,在全国得到广泛应用^[21-22]。本文利用Lamb-Jenkinson环流分型法,考虑沙尘污染受上风向甘肃、内蒙古等地传输影响较大,影响系统主要出现在宁夏偏西偏北方向,为了避免影响系统超出研究范围、影响分型结果,以宁夏上风向地区甘肃和内蒙古交界处附近(40°N、100°E)为中心点,在25°—55°N、80°—120°E范围内,每隔5个纬度、10个经度的网格上取16个点(P1~P16,图1),再由格点海平面气压值,通过中央差分的计算方案,得到6个环流指数^[23]:

$$u = \frac{1}{2}(P_{12} + P_{13} - P_4 - P_5) \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{4 \cos \alpha}(P_5 + 2P_9 + P_{13} - P_4 - 2P_8 - P_{12}) \quad (2)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

$$\zeta_u = -\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1}(P_{15} + P_{16} - P_8 - P_9) - \frac{1}{2} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_2}(P_8 + P_9 - P_1 - P_2) \quad (4)$$

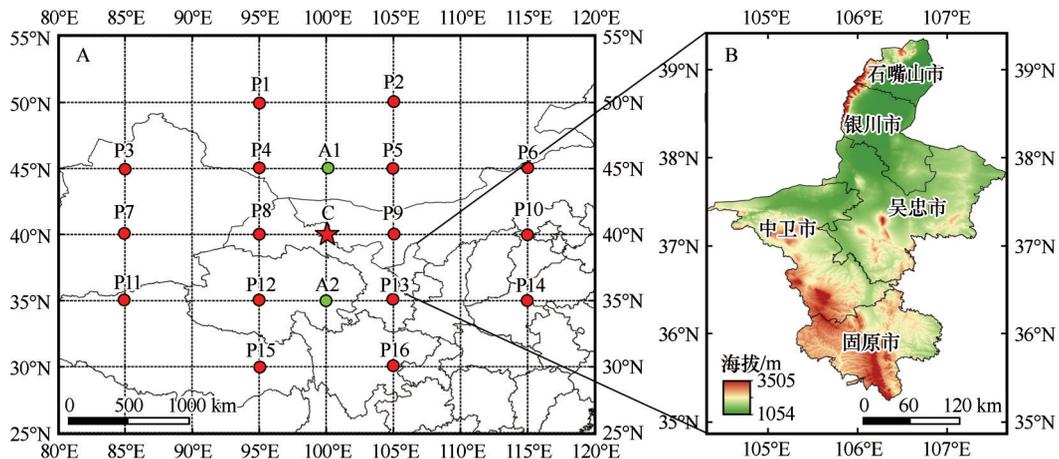
$$\zeta_v = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{4} \frac{1}{2 \cos^2 \alpha}(P_6 + 2P_{10} + P_{14} - P_5 - 2P_9 - P_{13} + P_3 + 2P_7 + P_{11} - P_4 - 2P_8 - P_{12}) \quad (5)$$

$$\zeta = \zeta_u + \zeta_v \quad (6)$$

式中: $P_1 \sim P_{16}$ 是该格点上的海平面气压值; α 、 α_1 和 α_2 分别为C、 A_1 和 A_2 点的纬度值。 V 是地转风; u 、 v 分别为地转风的纬向分量和经向分量; ζ 是地转涡度; ζ_u 是 u 的经向梯度; ζ_v 是 v 的纬向梯度,单位均为hPa/10°。地转风的方向由以下公式确定:

$$\begin{cases} v < 0, \alpha = \arctan(u/v) \\ v > 0, \alpha = \arctan(u/v) + 180^\circ \end{cases} \quad (7)$$

计算中心点的地转风(u, v, V)和涡度(ζ_u, ζ_v, ζ)共6个环流指数,根据地转风速、风向及涡度值将环流型划分为平直气流型、旋转型和混合型三大类,



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)1822,宁S(2022)001)制作,底图边界无修改

图 1 划分环流类型所选的 16 个格点位置(A)及宁夏地理位置(B)

Fig.1 Distribution of 16 grid points for classification of circulation types (A) and the geography location of Ningxia (B)

由此将宁夏及周边范围内地面环流特征划分出 27 种不同的环流类型(表 1)。这一方法得到的分型具有清晰明确的物理意义,如 A 型,说明该区域被反气旋控制(高压型),如为 C 型则为气旋控制(低压

型),N 型则表示为偏北的地转风气流控制,AN 型则表示为高值系统控制下的偏北地转风影响,其余以此类推。U 型没有明确的物理意义,表示较不明显的系统。

表 1 Lamb-Jenkinson 环流分型表

Table 1 Lamb-Jenkinson circulation type classification scheme

$ \zeta \leq V$ (平直气流类)	$ \zeta \geq 2V$ (旋转类)	$V < \zeta < 2V$ (混合类)	$V < 6$, 且 $ \zeta < 6$
N:北、NE:东北、E:东、SE:东南、S:南 SW:西南、W:西、NW:西北	A:反气旋 C:气旋	AN、ANE、AE、ASE、AS、ASW、AW、ANW、CN、CNE CE、CSE、CS、CSW、CW、CNW	U:无定义型

为更好地研究环流型与沙尘重污染的关系,参考文献[24],定义 F_1 和 F_2 分别为某种环流型下和所有环流型下沙尘重污染日数所占比例,并利用 F_1/F_2 的值来分析不同环流型对沙尘重污染的影响,当 $F_1/F_2 > 1$ 时,表明该环流型下较易出现沙尘重污染,反之不易出现。

1.2.2 HYSPLIT 后向轨迹模型

HYSPLIT 后向轨迹模型是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型[25],该模型采用了较完整的输送、扩散和沉降模式,已被广泛应用于大气污染物传输和扩散的研究[26-27],模拟起始高度选取能够较为准确反映边界层平均流层特征的相对地面高度 500 m[28-29]。后向轨迹聚类分析是根据气流轨迹的传输速度和方向,对所有到达模式受点的气流轨迹进行聚类分组,以判断受点的主导气流方向和污染物潜在来源[30]。

1.2.3 PSCF 和 CWT 分析

潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)是以后向轨迹模型为基础的网格化统计分析方法[31-32],能够半定量地得到潜在污染源区分布和气流轨迹浓度权重,从而分析不同轨迹和潜在源区的污染程度[33-34]。

PSCF 法首先选定覆盖气流轨迹分布的区域,创建一定分辨率的矩阵网格(i, j)并对污染物浓度设定阈值,当气流轨迹的污染物浓度高于阈值时标记为污染轨迹。将经过网格(i, j)的污染轨迹端点数 $m_{i,j}$ 与落在该网格内的所有轨迹端点数 $n_{i,j}$ 相比,即得到 PSCF 值:

$$PSCF_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}} W_{i,j} \quad (8)$$

$$W_{i,j} = \begin{cases} 1.00 & n_{i,j} > 3.0n_{avg} \\ 0.70 & n_{avg} < n_{i,j} \leq 3.0n_{avg} \\ 0.42 & 0.5n_{avg} < n_{i,j} \leq n_{avg} \\ 0.17 & 0 < n_{i,j} \leq 0.5n_{avg} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $PSCF_{i,j}$ 为网格(i, j)的权重 PSCF; n_{avg} 为所有网

格的平均轨迹端点数。*PSCF*高值区即污染物质量浓度的潜在源区,经过该区域的轨迹即为对污染物质量浓度有影响的输送路径。

*CWT*反映每个网格对沙尘污染的贡献程度^[35]:

$$CWT_{i,j} = \frac{\sum C_l \tau_{i,j,l}}{\sum \tau_{i,j,l}} \times W_{i,j} \quad (10)$$

式中: $CWT_{i,j}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)为网格(i,j)中的 PM_{10} 平均权重质量浓度; C_l 为气流 l 经过网格(i,j)时的 PM_{10} 平均权重质量浓度; $\tau_{i,j,l}$ 为气流 l 在网格(i,j)的停留时间。*CWT*越大表示该网格区域对受体站点 PM_{10} 质量浓度贡献越大。本研究在分析*PSCF*和*CWT*时,设定 PM_{10} 二级标准日均浓度限值 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为阈值,当气流对应的 PM_{10} 浓度大于此值时,就认定为污染气流。

2 结果与分析

2.1 宁夏沙尘重污染状况

2018—2021年,宁夏各地市沙尘重污染日数为1~20 d,2021年沙尘重污染日数明显增加,银川、石嘴山、吴忠、中卫四市均超过10 d。从空间分布来看,中卫市沙尘重污染日数最多,2018—2021年累计39 d,这是因为中卫市地处宁夏中西部,距离沙源地近,且本地沙源条件丰富,当大气不稳定或遇大风时极易起沙;吴忠和石嘴山两市也较多,分别为

31 d和27 d;银川市和固原市较少,固原市最少,这是因为两市分别地处贺兰山东麓和六盘山区,冷空气易受山脉阻挡,风力减小,且六盘山植被覆盖率高,对沙尘有一定的抑制作用(图2)。

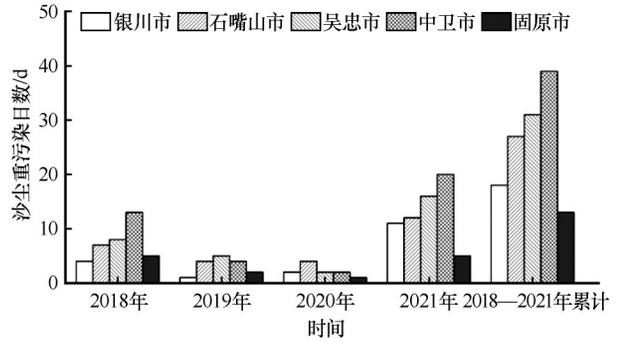


图2 2018—2021年宁夏五地市沙尘重污染日数
Fig.2 Distribution of heavy dust pollution days in Ningxia from 2018 to 2021

2.2 沙尘重污染天气主要环流型

由图3可见,影响宁夏及周边地区的主要环流型(出现频率>5%)有6种,分别为A、C、E、NW、SE及W型,出现频率共计64%。较易造成全区沙尘重污染天气的环流型($F_1/F_2 > 1$)有10种,分别属反气旋式平直环流型(A、AE、AN、ANE、ANW)、气旋式平直环流型(CE、CSE)和平直环流型(E、N、NE)。其中,反气旋控制下的偏北、偏东、东北风型(AN、AE、ANE)和气旋控制下的偏东风型(CE)下出现重污染频率更高。

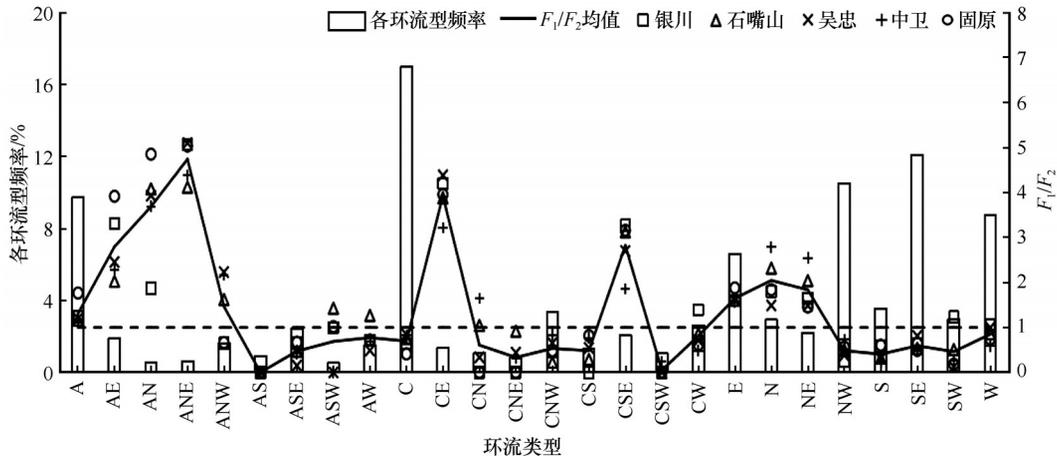


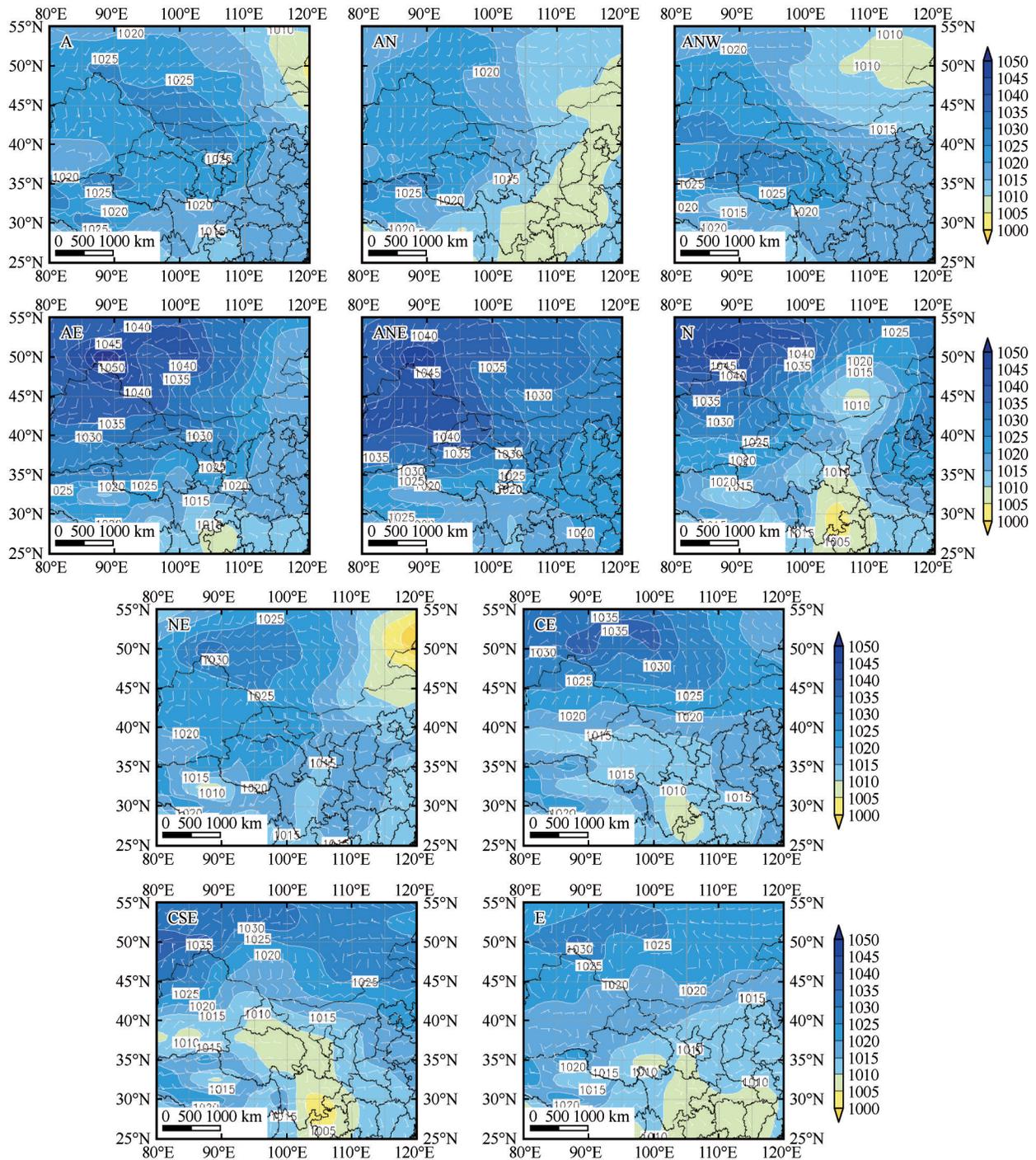
图3 2018—2021年宁夏各环流型出现频率及 F_1/F_2 值分布

Fig.3 The percentage of circulation types and F_1/F_2 values in Ningxia from 2018 to 2021

2.3 易污染环流型特征及归类

由图4可见,A型、AN型和ANW型的地面冷高压位于青海省西部或北部,强度较弱,中心气压平均为1 025 hPa,宁夏处于冷高压前部偏西气流中,

这3类环流型归为偏西路径型。AE型、ANE型、N型和NE型的地面冷高压中心位于新疆以北地区,强度较强,中心气压1 030~1 045 hPa,宁夏处于冷高压前部西北气流中,且风力相对较大,这4类环流型



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)1822)制作,底图边界无修改

图 4 易污染环流型海平面气压合成图(单位:hPa)叠加 10 m 风场图

Fig.4 Composite map of easily polluted circulation sea level pressure (unit: hPa) superimposed with 10 m wind field map

归为西北路径型。CE型、CSE型和E型下宁夏处于蒙古冷高压底部偏北和东北气流中,这3类环流型归为偏北路径型。

2.4 不同路径冷空气对宁夏沙尘重污染天气影响特征

由表 2 可见,偏西路径型下中卫市最先出现沙

尘重污染天气的频率最高,达 87.7%;西北路径型下中卫市最先出现沙尘重污染天气的频率最高,为 58.6%,其次是石嘴山市,为 41.4%;偏北路径型下石嘴山市最先出现沙尘重污染天气的频率最高,达 71.5%。分析结果表明,不同路径冷空气影响下,位于贺兰山南北两个风口的中卫和石嘴山两市最先出现沙尘重污染天气。

表2 不同路径冷空气影响下各地市首先出现沙尘重污染的频率(%)

Table 2 The frequency of heavy dust pollution in each city under the influence of cold air in different paths (%)

路径类型	银川	石嘴山	吴忠	中卫	固原
偏西路径型	0.0	12.3	0.0	87.7	0.0
西北路径型	0.0	41.4	0.0	58.6	0.0
偏北路径型	0.0	71.5	0.0	28.5	0.0

偏西路径型:由图5发现,受偏西路径冷空气及上风向沙尘传输影响,中卫市最先出现沙尘重污染天气,21日10:00已达严重污染级别,石嘴山、吴忠、银川、固原四市依次滞后1h,相比中卫市偏晚1~4h。

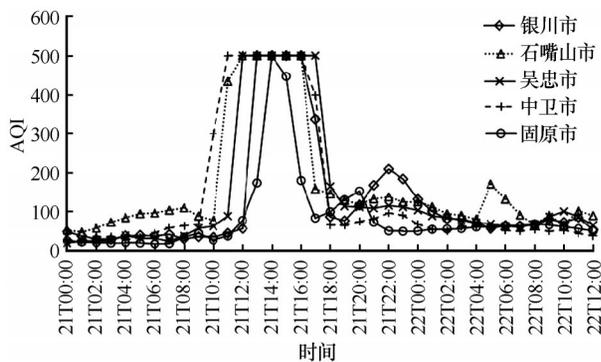


图5 2018年5月21日00:00至22日12:00宁夏各地市AQI变化趋势

Fig.5 Hourly change of AQI in Ningxia from 00:00 on May 21 to 12:00 on May 22, 2018

西北路径型:图6显示,受西北路径冷空气及上风向沙尘传输影响,贺兰山的南北风口即中卫和石嘴山两市出现污染较早,分别于25日11:00和15:00达到严重污染,固原、吴忠、银川三市比中卫市晚5~

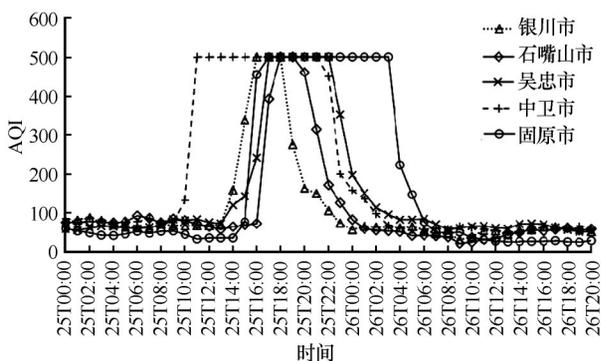


图6 2020年3月25日00:00至26日20:00宁夏各地市AQI变化趋势

Fig.6 Hourly change of AQI in Ningxia from 00:00 on March 25 to 20:00 on March 26, 2020

6h,在16:00—17:00达到严重污染。

偏北路径型:图7显示,受偏北路径冷空气及上风向沙尘传输影响,宁夏自北向南出现了一次沙尘天气过程,石嘴山市最先出现沙尘重污染,3日02:00空气质量已达严重污染级别,银川、吴忠、中卫三市偏晚3~5h,固原市偏晚11h。

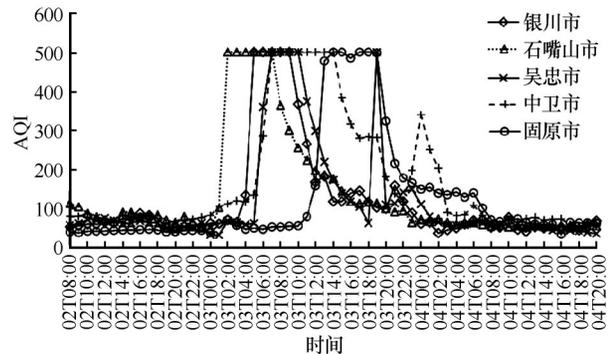


图7 2020年5月2日08:00至4日20:00宁夏各地市AQI变化趋势

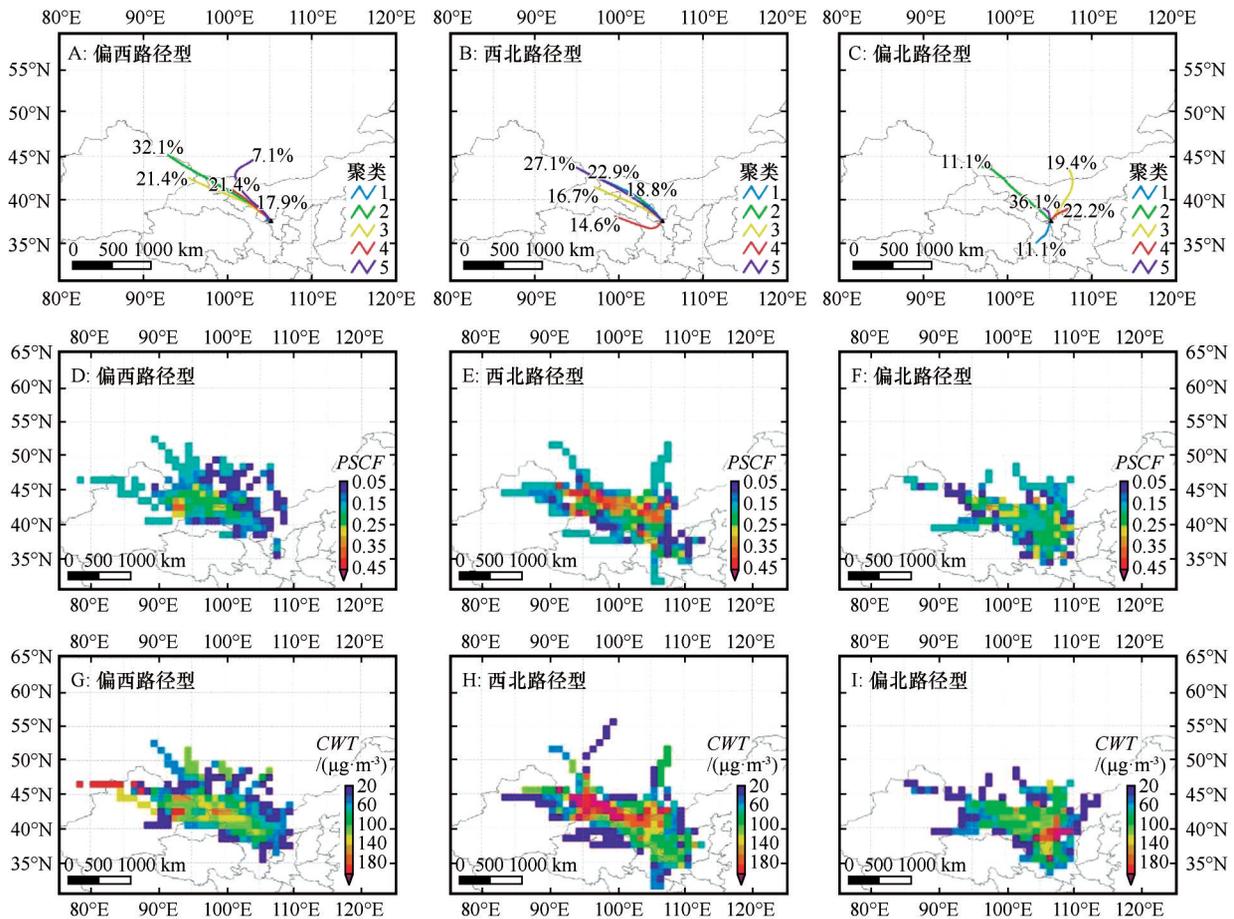
Fig.7 Hourly change of AQI in Ningxia from 08:00 on May 2 to 20:00 on May 4, 2020

2.5 不同路径冷空气沙尘传输轨迹及污染来源和贡献率

为了解不同路径冷空气影响下宁夏沙尘污染来源及输送路径差异,选择沙尘重污染日数最多的中卫市(37.53°E, 105.18°N)为模拟受点,首先计算2018—2021年10种易污染天气型下沙尘重污染日00:00、06:00、12:00、18:00 UTC到达受点的24h后向气流轨迹,然后根据偏西路径型、西北路径型和偏北路径型对轨迹进行聚类。

偏西路径型沙尘传输轨迹以偏西和西北方向为主,第2、3、4类气流轨迹占总轨迹数的74.9%,主要来自新疆东北部、东部及内蒙古西部,沿内蒙古和甘肃省界进入中卫,输送距离较长(图8A)。污染源区主要分布在新疆东部、内蒙古西北部和蒙古国西南部的交界处附近,主要受额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠沙尘传输影响(图8D),对中卫市PM₁₀质量浓度的贡献均在100~160 μg·m⁻³(图8G)。

西北路径型沙尘传输轨迹仍以偏西和西北方向为主,第1、2类和第5类气流轨迹主要来自内蒙古西部和新疆东部,此3类气流轨迹基本重合,沿额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠进入中卫,输送距离较长(图8B)。污染源区分布与偏西



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)1822)制作,底图边界无修改

图 8 2018—2021 年中卫市后向轨迹聚类(A, B, C)、PSCF(D, E, F)及 CWT(G, H, I)

Fig.8 Distribution of backward trajectory clustering (A, B, C), PSCF (D, E, F) and CWT (G, H, I) in Zhongwei from 2018 to 2021

路径型相似,但分布更广(图 8E),对沙尘污染的贡献更大,新疆哈密市东部、蒙古国西南部、额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠附近地区对中卫市 PM₁₀ 质量浓度的贡献均在 160 μg·m⁻³ 以上(图 8H)。

偏北路径型沙尘传输轨迹以西北和东北方向为主,占总气流轨迹的 88.9%,其中西北方向第 5 类和东北方向第 4 类气流轨迹分别占 36.1% 和 22.2%,占比较大且输送距离短(图 8C)。污染源区的范围较小(图 8F),腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地附近对中卫市 PM₁₀ 质量浓度的贡献超过 140 μg·m⁻³,其中偏东方向的毛乌素沙地对 PM₁₀ 质量浓度的贡献超过 160 μg·m⁻³(图 8I)。

3 结论

2018—2021 年,宁夏各地市沙尘重污染日数在 1~20 d,2021 年较多,银川、石嘴山、吴忠、中卫四市均在 10 d 以上;空间分布来看,中卫市沙尘重污染

日数最多,银川和固原两市相对较少。

较易造成全区沙尘重污染天气的冷空气路径和环流型分别为偏西路径型(A、AN、ANW)、西北路径型(AE、ANE、N、NE)和偏北路径型(CE、CSE、E)。偏西路径型地面冷高压位于青海省西部或北部,强度较弱,宁夏处于冷高压前部偏西气流中;西北路径型地面冷高压中心位于新疆以北地区,强度较强,宁夏处于冷高压前部西北气流中,且风力相对较大;偏北路径型下宁夏处于蒙古冷高压底部偏北和东北气流中。

不同路径空气影响下,位于贺兰山南北两个风口的中卫和石嘴山两市最先出现沙尘重污染天气。

偏西和西北路径冷空气影响下,宁夏沙尘传输轨迹以偏西和西北方向为主,沙尘源地主要来自额济纳旗周边戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠,沙源地对 PM₁₀ 质量浓度的贡献分别为 80~160 μg·m⁻³ 和 >160 μg·m⁻³;偏北路径冷空气影响下的沙尘传输轨

迹以西北和东北方向为主,腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地对 PM_{10} 质量浓度的贡献 $>140 \mu g \cdot m^{-3}$,其中偏东方向的毛乌素沙地对 PM_{10} 质量浓度的贡献 $>160 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

参考文献:

- [1] 冯鑫媛,王式功,杨德保,等.近几年沙尘天气对中国北方环保重点城市可吸入颗粒物污染的影响[J].中国沙漠,2011,31(3):735-740.
- [2] 陈杰,赵素平,殷代英,等.沙尘天气过程对中国北方城市空气质量的影响[J].中国沙漠,2015,35(2):423-430.
- [3] 康丽泰,陈思宇.中国北方一次沙尘天气过程的数值模拟[J].中国沙漠,2017,37(2):321-331.
- [4] 胡元洁,蒋楠.沙尘天气对西安市环境空气质量的影响[J].中国沙漠,2020,40(6):53-60.
- [5] 柳丹,张武,陈艳,等.基于卫星遥感的中国西北地区沙尘天气发生机理及传输路径分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1605-1616.
- [6] 王宁,陈健,张缘园,等.2021年中国北方首次沙尘天气的多源遥感分析[J].中国环境科学,2022,42(5):2002-2014.
- [7] 张高英,赵思雄,孙建华.近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J].气候与环境研究,2004,9(1):101-115.
- [8] 李培荣,姚静,张煦庭,等.西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究[J].陕西气象,2022(4):7-14.
- [9] Chen X L, Fan S J, Li J N, et al. Typical weather characteristics associated with air pollution in Hong Kong area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2008, 14(2): 101-104.
- [10] 白婷,田万顺,丁建芳,等.河南省空气污染天气分型研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(12):81-88.
- [11] 陈龙,智协飞,覃军,等.影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J].气象,2016,42(7):819-826.
- [12] 杨旭,张小玲,康延臻,等.京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J].中国环境科学,2017,37(9):3201-3209.
- [13] 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.
- [14] 张璐,宋桂英,范凡,等.2021年3月14-16日中国北方地区沙尘暴天气过程诊断及沙尘污染输送分析[J].环境科学学报,2022,42(9):351-363.
- [15] 陈豫英,陈楠,谭志强.宁夏不同强度沙尘天气动力机制[J].中国沙漠,2015,35(2):438-447.
- [16] 陈豫英,陈楠,谭志强,等.“2013.3.9”宁夏强沙尘暴天气的热力动力条件分析[J].干旱区地理,2016,39(2):285-293.
- [17] 谭志强,桑建人,纪晓玲,等.宁夏一次大风扬沙天气过程机制分析[J].干旱区地理,2017,40(6):1134-1142.
- [18] 刘玉兰,马锦艳,辛尧胜,等.银川市2次强沙尘天气气溶胶浓度及传输特征[J].环境科学与技术,2017,40(2):65-69.
- [19] 严晓瑜,缙晓辉,武万里,等.银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J].环境科学学报,2018,38(5):1727-1738.
- [20] Huth R, Beck C, Philipp A, et al. Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2010, 1146(1): 105-152.
- [21] 俞科爱,胡晓,黄旋旋,等.宁波区域霾过程的天气分型及环流场特征[J].气象,2015,1(12):1514-1524.
- [22] 王琼,沈瑞珊,庞杨.河北省重污染天气分型及其预报概念模型研究[J].气象与环境科学,2020,43(4):105-112.
- [23] 朱艳峰,陈德亮,李维京,等.Lamb-Jenkinson环流客观分型方法及其在中国的应用[J].南京气象学院学报,2007(3):289-297.
- [24] 段雯瑜,陈敏东,黄山江,等.融合Lamb-Jenkinson分型法和LSTM神经网络的 $PM_{2.5}$ 预测研究[J].环境科学与技术,2020,43(1):92-97.
- [25] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2059-2077.
- [26] 王剑,徐美,叶霞,等.沧州市冬春季 PM_{10} 污染特征及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):46-51.
- [27] 葛跃,王明新,白雪,等.苏锡常地区 $PM_{2.5}$ 污染特征及其潜在源区分析[J].环境科学学报,2017,37(3):803-813.
- [28] 刘娜,余晔,张莉燕,等.2016-2018年西宁市颗粒物来源及输送差异分析[J].环境科学学报,2021,41(10):4212-4227.
- [29] 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.
- [30] 郭萍萍,杨建才,殷雪莲,等.甘肃省春季一次连续浮尘天气过程分析[J].干旱气象,2015,33(2):303-309.
- [31] Ashbaugh L. A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions[J]. Air Repair, 1983, 33(11): 1096-1098.
- [32] Andreas S. Trajectory statistics: a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(4):579-587.
- [33] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loading at Xi'an, China during spring[J]. Science of the Total Environment, 2006, 368: 875-883.
- [34] 杨燕萍,王莉娜,杨丽丽,等.兰州市沙尘天气污染特征及潜在源区[J].中国沙漠,2020,40(3):60-66.
- [35] 李汉林,何清,赵权威.喀什地区 PM_{10} 输送路径及潜在源区[J].中国沙漠,2021,41(5):62-70.

Characteristics of heavy dust pollution weather caused by cold air with different routes in Ningxia, China

Yuan Ruirui^{1,2,3}, Wang Jianying^{1,2,3}, Zhang Weihong⁴, Zhang Suzhao^{1,2,5}, Wang Kun^{1,2,3}, Yong Jia^{1,2,3}

(1. CMA Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Meteorological Service Center, Yinchuan 750002, China; 4. Ecological Environment Monitoring Center of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China; 5. Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002, China)

Abstract: To investigate the characteristics and transport rules of cold air in different routes on heavy dust pollution weather in Ningxia, we summarize the circulation characteristics that are easy to cause heavy dust pollution weather in Ningxia on the basis of objective classification of daily ground circulation by using environmental and meteorological data and NCEP reanalysis data. Further, the weather characteristics, pollution sources and contribution rates of heavy dust pollution under the influence of cold air in different routes were analyzed by using the backward trajectory model. The results show that: (1) The cold air routes and circulation pattern that are easy to cause heavy dust pollution weather in the whole region are westward path (A, AN, ANW), northwest path (AE, ANE, N, NE) and northward path (CE, CSE, E). (2) Affected by the cold air along the westward route, Zhongwei was the first city to experience heavy dust pollution; Affected by the cold air along the northwest route, Zhongwei and Shizuishan first experienced heavy dust pollution; Affected by the cold air along the northward route, Shizuishan was the first city to experience heavy dust pollution. (3) Under the influence of cold air along the westward route and the northwest route, the transport track of dust in Ningxia was mainly west and northwest, and the dust sources were mainly from the gobi around Ejin Banner, Badain Jaran Desert and Tengger Desert, the contribution of sand source to the PM_{10} mass concentration was 80–160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and above 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively; Under the influence of cold air along the northward route, the transport track of dust in Ningxia was mainly northwest and northeast, and the contribution of Tengger Desert, Ulanbh Desert and Mu Us Sandy Land to the PM_{10} mass concentration was above 140 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, among which, the contribution of the Mu Us Sandy Land in the easterly direction was above 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Key words: heavy dust pollution; circulation classification; transport rules