

常文渊,彭艳. 2013—2023 年关中地区冬季灰霾天气季节内环流特征分析[J]. 陕西气象, 2025(3):57-65.

文章编号:1006-4354(2025)03-0057-09

2013—2023 年关中地区冬季灰霾天气 季节内环流特征分析

常文渊¹, 彭艳^{2,3}

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

2. 陕西省气象科学研究所, 西安 710016;

3. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710016)

摘要:利用大气再分析资料和地面 $PM_{2.5}$ 观测数据, 开展 2013—2023 年冬季(11 月—次年 2 月)关中地区灰霾天气季节内环流特征分析, 并基于准地转理论阐述对流层大气结构异常对地面空气质量的影响。分析表明, 关中冬季 $PM_{2.5}$ 有明显 10~20 d 季节内波动; 灰霾发生伴随欧亚大陆中部 250 hPa 低频波(>20 d)负异常, 陕西北部和内蒙古地区中频波(10~20 d)正异常。关中位于东亚西风急流入口区北侧, 西风急流异常显著影响地面空气质量。根据准地转理论, 当西风急流入口区风速减弱, 在急流入口区出现非地转的经向次级环流异常, 导致关中地区出现大气上升运动。同时, 关中地处高空环流的脊前槽后, 反气旋涡度平流进一步促使当地高度场抬升, 加强次级环流异常。在温度和涡度平流共同作用下, 关中平原出现地面南风异常, 气温偏高、相对湿度偏高、大气边界层高度偏低, 不利于空气污染物扩散, 形成灰霾天气。关中冬季灰霾季节内环流特征与欧亚大陆遥相关型负位相类似。环流分类显示, 灰霾天与清洁天分类特征交替出现。由于中频波移动相对缓慢, 当减弱西风持续维持, 其激发的局地次级环流有助于出现持续性灰霾天气。

关键词: $PM_{2.5}$; 季节内环流; 准地转理论; 西风急流

中图分类号: X513

文献标识码: A

大气细颗粒物($PM_{2.5}$)污染是我国冬季面临的严重大气环境问题。自 2013 年实施《大气污染防治行动计划》和《蓝天保卫战三年行动计划》以来, 我国中东部城市灰霾污染得到缓解, $PM_{2.5}$ 年均质量浓度显著降低^[1-3], 冬季空气质量持续改善; 但人为排放进一步下降空间有限, 气候变暖又加剧静稳天气发生频率^[4], 维持 $PM_{2.5}$ 治理成果仍然面临挑战。深入理解灰霾天气发生的大气环流特征对提升灰霾预报、区分灰霾天气的自然和人为贡献、评估排放治理成效都有重要意义。

灰霾天气是气候强迫和天气系统响应的结果。气候强迫激发行星波异常, 准周期地在下游

产生静稳天气。由于低中频波移动缓慢, 静稳天气条件一旦形成就持续数日, 导致持续性灰霾天气发生。目前很多研究关注年际和年代际环流异常对华北灰霾影响, 包括北极海冰^[5-6]、欧亚大陆积雪^[7]、厄尔尼诺^[8-9]、太平洋海温^[10-11]等强迫因子。近年也有研究关注灰霾与季节内大气环流关系, 比如: Zhang 等^[9]指出在 2015—2016 年超级厄尔尼诺信号减弱并伴随北极涛动转为负位相, 这改善了当年华北冬季空气质量; Xue 等^[12]指出华北灰霾在 9—10 月和 11—12 月两个时期有反位相变化并与东大西洋/西俄罗斯遥相关型和北大西洋海温变化有关; An 等^[13]发现巴伦支海海

收稿日期: 2024-05-13

作者简介: 常文渊(1979—), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 博士, 助理研究员, 主要从事气溶胶和 CO_2 模拟诊断研究。

基金项目: 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021G-11; 2019M-9)

冰异常引起华北 $\text{PM}_{2.5}$ 在冬季早晚两个时期反位相变化。然而,目前已有研究主要描述灰霾环流遥相关特征,利用天气动力学理论理解灰霾成因的工作较少。

伴随我国制造业西迁,在我国东部空气质量显著改善的同时,西部冬季空气质量却有可能恶化^[3]。关中城市群地处陕西秦岭北麓渭河冲积平原盆地,人口密度高,空气污染排放高,地形原因不利于空气污染扩散,分析当地灰霾环流特征很有必要。本文利用大气再分析资料和地面 $\text{PM}_{2.5}$ 观测数据,分析 2013—2023 年冬季关中灰霾事件的 10~20 d 北半球中纬度环流,利用准地转理论初步解释对流层高层大气环流异常影响地面空气质量的天气环流机制。

1 数据与方法

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据来自中国环境监测总站的逐小时观测平均值。以关中平原(108.5°E~109.7°E, 34.0°N~34.6°N)台站的观测均值代表关中城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度。所选台站需在研究时段内的缺测数据量小于 10%,缺测值由该站相邻时刻的观测值进行线性插值替换。文中所述 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度去均值序列是减去了每年冬季(11、12、1 和 2 月)的均值。大气环流分析基于欧洲中期天气预报中心的逐小时 ERA5 大气再分析资料。文中分析基于每日世界时 06 时(北京时间 14 时) $\text{PM}_{2.5}$ 观测和 ERA5 大气再分析资料。第 3.2 节的大气环流分类使用正交经验函数分解加 k-means 分类方法^[14]。

2 关中地区灰霾与季节内环流的联系

2.1 关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 冬季变化特征

图 1 显示 2013—2023 年 11 个冬季关中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度去均值序列及其小波谱。2013—2014 和 2016—2017 年冬季有最严重的灰霾, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度超过 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其他冬季间断性出现最大值在 $100\sim 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的灰霾事件。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度具有显著的年际和天气尺度变化特征。小波分析显示,多数年份 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度波动都包括一个较显著的 10~20 d 周期,比如 2016—2017、2020—2021、2021—2022 年。这表明 10~20 d 季节内环流与灰霾天气关系密切。

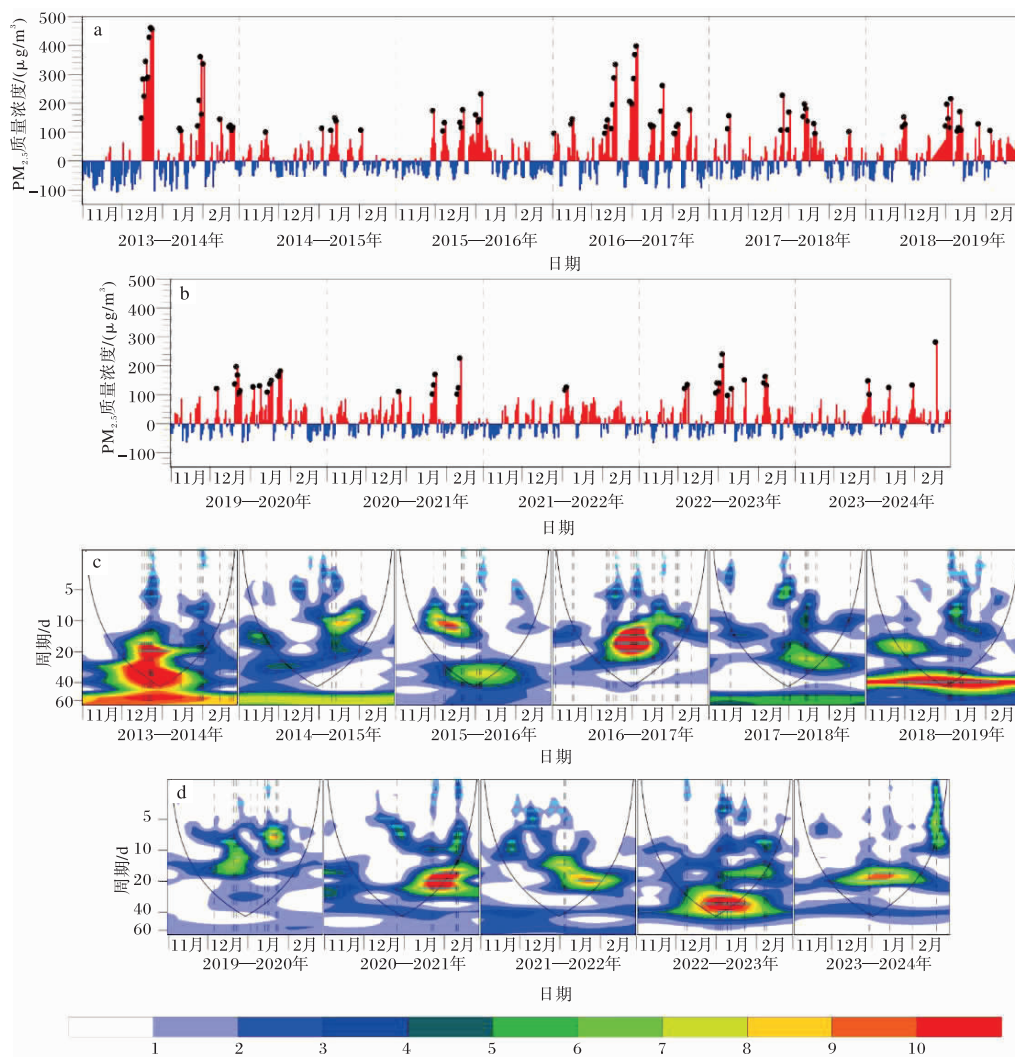
2013—2014 年冬季例外,当年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大于 20 d 的低频能量最强,表明长周期槽脊结构异常并长期维持是造成当年冬季持续性灰霾的环流背景。2022—2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现类似的长周期波动异常,但得益于空气污染治理, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现了长期下降趋势,使该年冬季灰霾严重程度不及 2013—2014 年。

2.2 关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 与北半球 250 hPa 高度场异常相关性特征

图 2(图见第 60 页)显示关中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与同期 250 hPa 高度场异常的相关性。中纬度有两个显著的负相关中心,分别位于关中平原上下游(图 2a):最强负中心在欧亚大陆中部,位于威海和新疆之间;次强负中心位于日本以东,西北太平洋上空。介于两者之间的正相关中心位于东北地区。这个相关型呈现一个全球纬向 4 波数的行星波结构。进一步将 $\text{PM}_{2.5}$ 与不同周期的高度场计算相关显示,周期波动大于 20 d 的低频相关结构(图 2b)与原始场相关结构(图 2a)相似。4 个行星波大槽分别位于欧亚大陆中部、日本以东和北美东西两侧。这表明大于 20 d 缓慢移动的行星波槽脊结构是导致关中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的基本背景。然而,在关中地区附近,低频波异常与关中 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性降低,甚至关中以北地区相关不能通过显著性检验。

事实上,低频波向下游发展过程中激发出的中高频天气波对关中 $\text{PM}_{2.5}$ 变化起更直接的作用。图 2c 显示了 10~20 d 中频天气波与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性。关中 $\text{PM}_{2.5}$ 与其紧邻上游地区高度场异常显著正相关,填补了低频相关图的空白(图 2b)。关中平原位于正相关中心下游边缘,显著正相关带位于陕西北侧,从内蒙古延伸至东北,表明中频波正异常促使关中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度上升。

图 2d 显示小于 9 d 的高频天气波异常与关中 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性。由于高频波的短时和小尺度特征,其与 $\text{PM}_{2.5}$ 的显著相关结构只局限于关中地区邻近一个波长的上下游,相关性最弱。若进一步将 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度拆分为高低两组样本,分别与各周期的大气环流求相关,发现高频波与 $\text{PM}_{2.5}$ 低质量浓度相关更好(图略),而与 $\text{PM}_{2.5}$ 高



a、b 中黑点和 c、d 中虚线表示 PM_{2.5} 质量浓度超过 11 个冬季的第 90 百分位值。

图 1 2013—2023 年冬季关中 PM_{2.5} 质量浓度去均值序列(a,b;单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;红色为正异常,蓝色为负异常)及其小波谱(c,d;小波谱颜色越红表示波动能量越强;单位为 $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$)

质量浓度几乎不相关。这说明高频波主要通过频繁短时的槽脊系统过境清洁目标地区大气,降低 PM_{2.5} 质量浓度。严重灰霾事件更需要目标地区处于稳定缓慢移动的低中频天气系统控制下。换言之,低频行星波的位相确定当年冬季静稳天气发生的基本背景,缓慢移动的中频波构成了持续性静稳天气,快速移动的高频波周期性地清扫目标区域的空气污染物。

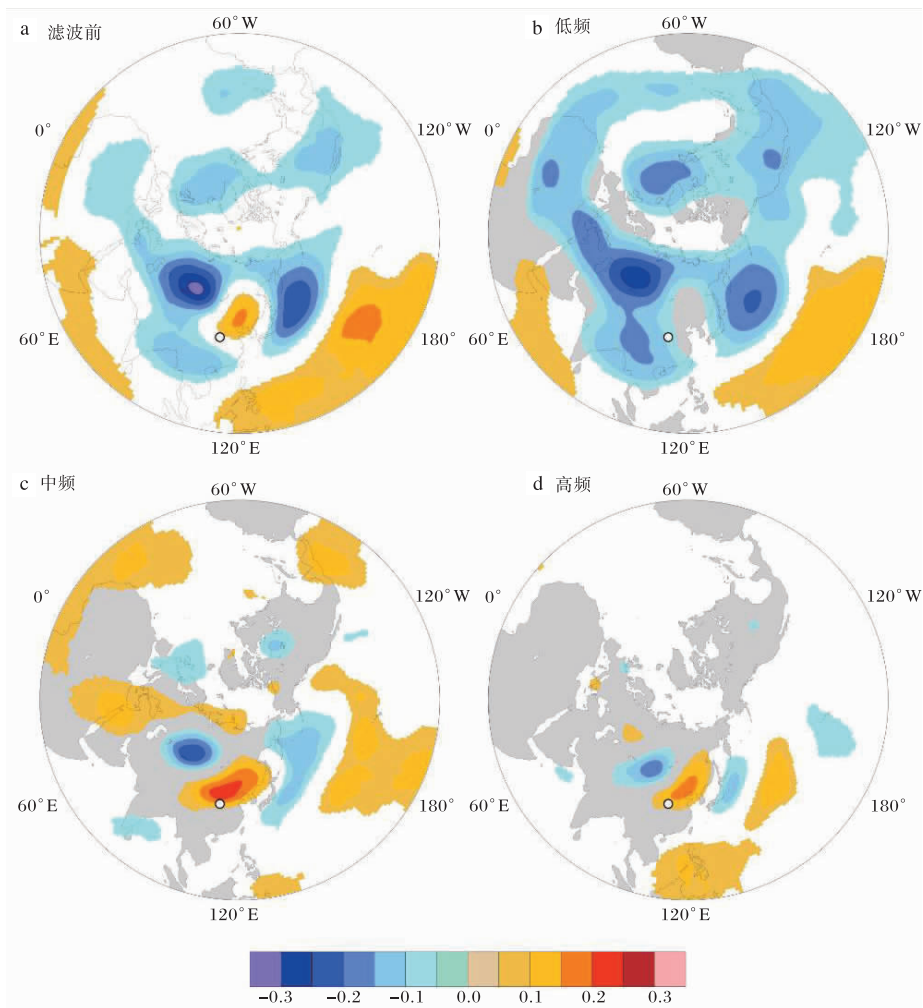
3 影响关中冬季空气质量的中频大气环流特征

3.1 准地转理论视角下的灰霾与清洁天气环流特征

前述分析说明北半球中纬度 10~20 d 中频

天气波对 PM_{2.5} 质量浓度高值影响大。本节根据准地转理论阐述背后的物理机制。根据 ω 方程,大气行星波槽脊移动造成的冷暖平流和涡度平流会破坏大气热成风平衡。为恢复热成风平衡,地转平流会激发出非地转的次级环流。次级环流改变对流层上下热力结构和垂直风廓线,引起大气垂直运动异常,造成地面空气压缩增温(或扩张冷却),导致地面风异常。气旋涡度平流和热平流导致大气上升运动,高度场出现正异常。反之,反气旋涡度平流和冷平流导致大气下沉运动,高度场出现负异常。

本文定义灰霾天和清洁天分别为关中 PM_{2.5}



填色区域表示通过 0.05 显著性检验;小圆圈表示关中位置(下同)。
图 2 2013—2023 年冬季关中地区 PM_{2.5} 质量浓度与同期北半球不同频率
250 hPa 高度场异常的同期相关性(文见第 58 页)

质量浓度高于 11 个冬季的第 90 百分位值和低于第 10 百分位值的样本。图 3 显示 2013—2023 年冬季灰霾天和清洁天中频波异常的合成情况。上下大气层厚度异常反映大气层的平均虚温异常,即热成风场异常。由于上层大气的高度场异常量级大于低层大气,图 3 也体现了 250 hPa 高度场异常特征。

首先,在冬季平均态上,关中地处东亚西风急流入口区北侧(图 3 黑色等风速线)。在急流入口区,纬向风梯度由西向东增强,但大气动量的平流输送趋于减弱,风速减弱,即急流入口区为辐合区。根据准地转理论,在经向气温梯度不变情况下,地转风速减弱破坏热成风平衡。为匹配减弱风速,经向气温梯度也需要减弱,因此急流入口区

激发出非地转的经向次级环流。该次级环流在大气上层产生南风异常,并在科氏力影响下转成西风异常分量,弥补急流入口区的减弱风速;同时在急流入口区北侧(即关中地区)形成经向次级环流的下沉支,在大气低层形成北风异常向南回流,在科氏力影响下也产生东风异常,最终增强急流入口区的垂直风切变,恢复热成风平衡。换言之,灰霾或清洁天气就是大尺度槽脊系统过境引起急流入口区非地转经向次级环流变化并改变地面大气扩散条件的结果。

在灰霾天(图 3a),欧亚大陆中高纬大气环流在下游产生热平流,这对应图 2c 正相关中心。关中平原位于对流层热异常南侧。热平流减弱了西风急流入口区的气温南北梯度,进而减弱西风急

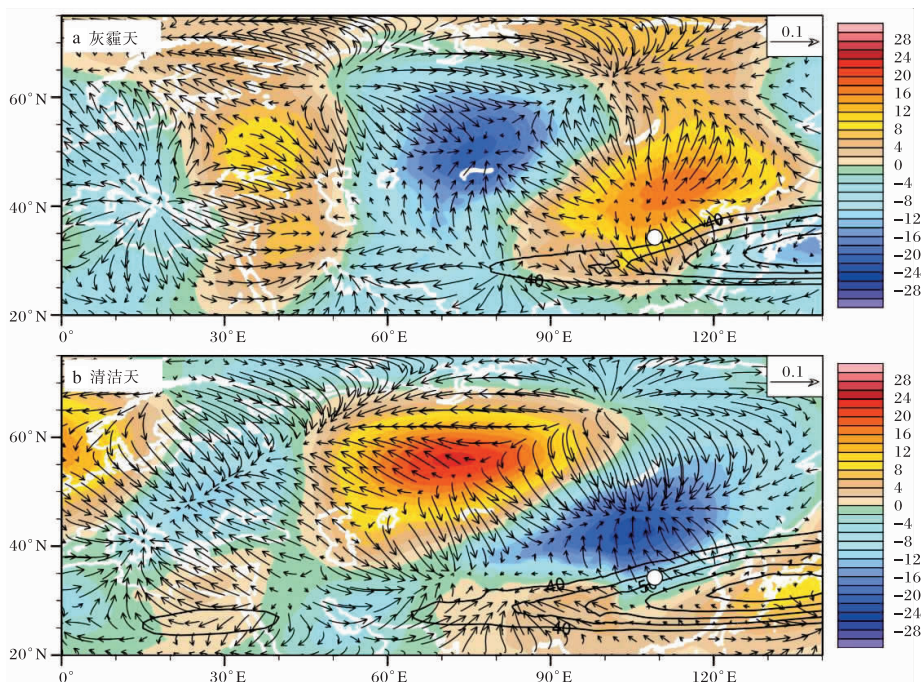


图3 2013—2023 年冬季灰霾天(a)和清洁天(b)10~20 d 中频尺度 250~850 hPa 平均厚度场异常(填色区,单位为 gpm)、250 hPa 纬向风(未滤波,黑色等值线,单位为 m/s), 250 hPa 中频波辐射散风异常(矢量场,单位为 m/s)。

流强度。在 100°E 经向垂直剖面上(图 4a),西风减弱在关中地区整个对流层都清晰可见。相应地,急流入口区经向次级环流减弱,次级环流下沉支减弱,关中地区有上升气流异常(图 4b)。同时,关中位于厚度场正异常南侧,高空环流脊前槽后,受反气旋涡度平流影响,当地高度场有上升趋势,加强次级环流异常。在温度和涡度平流共同作用下,关中以北上空 250 hPa 有风场辐散异常,关中上空出现北风异常(图 3a)。在地面,由于上层大气经向次级环流减弱,低层大气的北风异常回流分支减弱,关中地面有南风异常(图 5c),气温偏高(图 5a)、相对湿度偏高(图 5b)。由于关中空的上空西风减弱,大气垂直风切变减弱,大气湍流减弱,大气趋于静稳状态,大气边界层高度偏低(图 5d),不利于污染物扩散。高温高湿环境也有利于化学反应,加重二次污染物生成。

清洁天(图 3b)情形基本与灰霾天相反。西风急流北侧气温偏低,大气上层南北气温梯度加强,西风环流加强。关中地区增强的西风在整个对流层清晰可见(图 4c)。关中北侧出现 250 hPa 风场辐合异常(图 3b),关中处于下沉气流控制

(图 4d)。此下沉急流也是加强的西风急流激发出的经向次级环流。关中处于冷平流控制下(图 4c),地面偏冷(图 5e),陕西到华北大部相对湿度偏低(图 5f),地面北风异常(图 5g)。由于北方冷空气贴近地面南侵,大气边界层高度抬升(图 5h),大气扩散条件良好,不利于空气污染物堆积,空气质量改善。

3.2 灰霾天与清洁天的中频波动分类特征

本文将灰霾和清洁天气的中频环流各分为两类。在欧亚大陆尺度,两类灰霾环流异常呈现出反位相情况(图 6a、图 6b);同理,两类清洁天的环流异常也是反位相(图 6c、图 6d)。由于中低频系统特征尺度在 1 000 km 以上,而城市 $\text{PM}_{2.5}$ 代表尺度只有几十公里甚至更小。即使大陆尺度环流异常相反(相似),却可能因槽脊地理位置少许偏移导致局地空气质量相似(相反)。聚焦关中地区,灰霾 1 类(图 6a)和清洁 2 类(图 6d)分别与图 3 环流异常相似,反映即将到来的暖/冷平流前期的情形。灰霾 1 类的关中地区位于高空脊前槽后,大气斜压性强;灰霾 2 类时位于厚度场正异常(热平流)控制下,大气斜压性减弱。同理,清洁 2

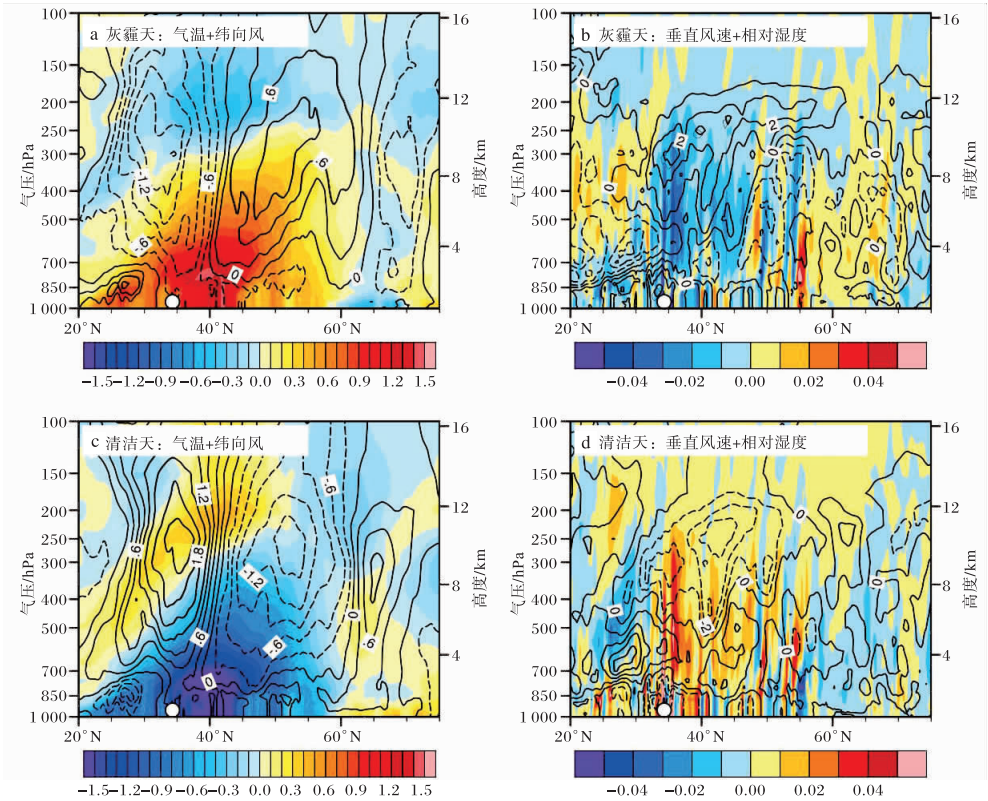


图 4 2013—2023 年冬季灰霾天(a,b)和清洁天(c,d) 10~20 d 中频尺度在 100°E 垂直剖面的气温(填色,单位为℃)、纬向风(等值线间隔 0.3 m/s)异常(a,c)和垂直速度(填色,单位为 m/s)、相对湿度(等值线间隔 1 %)异常(b,d)

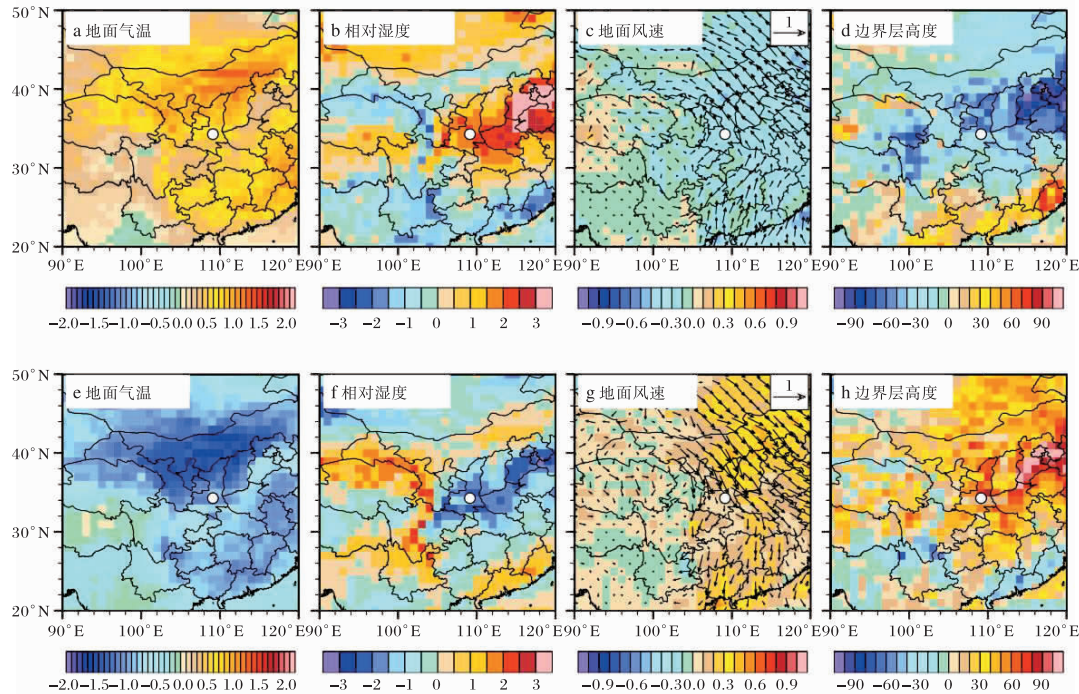
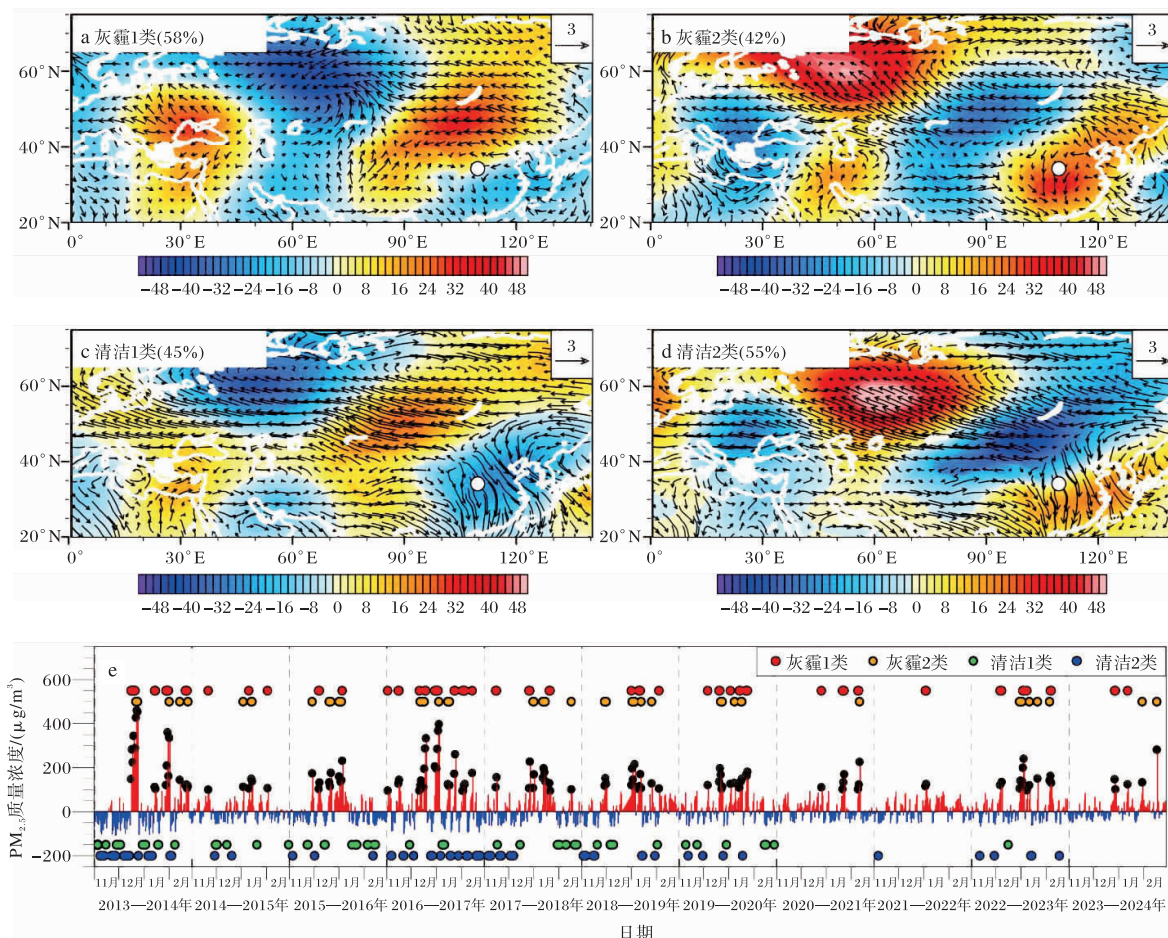


图 5 2013—2023 年冬季灰霾天(a~d)和清洁天(e~h)地面 2 m 气温异常(单位为℃)、相对湿度异常(%)、10 m 风场异常(单位为 m/s)、大气边界层高度异常(单位为 m)



a, b, c, d 中标注的百分数表示此类天气型所占比例。

图6 2013—2023 年冬季灰霾天(a,b)和清洁天(c,d) 10~20 d 中频尺度 250 hPa 高度场异常分类下的 250~850 hPa 厚度(填色,单位为 gpm)异常和地面 10 m 风场(单位为 m/s)异常,各天气型出现时刻及 PM_{2.5} 质量浓度去均值序列(e, 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 黑点表示 PM_{2.5} 质量浓度超过 11 个冬季的第 90 百分位值)

类的关中地区位于高空环流槽前脊后,局地大气斜压性强;而清洁 1 类时处于厚度场负异常(冷平流)控制下,局地大气斜压性减弱。分类环流的垂直气象要素异常与图 3 平均情形一致(图略)。

图 6e 标记了灰霾或清洁天环流分类出现时刻。两类环流个例交替出现,这体现出行星波向下游传递的过程。由于 10~20 d 中频波移动缓慢,因此一旦有利于灰霾的槽脊结构临近关中地区,若无排放控制,空气污染物将在未来 10 多天内累积,造成严重灰霾事件。同理,适当的 10~20 d 天气波也利于持续性的清洁天,不过清洁天还受小于一周的高频天气波过境(如寒潮)叠加影响。

注意灰霾 1 类和清洁 2 类的中频环流异常类

似于欧亚大陆遥相关型。由此,可以借鉴华北 PM_{2.5} 变化与大气遥相关机制的已发表研究:前期 8—11 月北极海冰减少导致欧亚大陆遥相关型负位相,有利我国中东部出现灰霾^[6];当前期秋季北极海冰减少(增加),引起随后 12—1 月地面向大气热输送增加(减少),增强(减弱)欧洲北部风暴轴,减少(增加)乌拉尔山阻塞,减弱(增强)西伯利亚高压,纬向西风加强(减速),减少(增加)北极冷空气南下^[15]。与此同时,当关中地区处于暖平流(冷平流)影响下时,关中地区上空西风减弱(增强),非地转经向次级环流异常导致地面出现南风(北风)异常,有利于出现灰霾(清洁)天气。

最后,注意灰霾 1 类和清洁 1 类的环流异常都类似欧亚大陆遥相关型负位相,而灰霾 2 类和

清洁 2 类的环流异常均类似遥相关正位相。即在大气遥相关型处于同一位相时,下游局地可能是灰霾天或清洁天。这表明由于高频环流波动与中低频环流相互作用,即使上游平均流异常结构相似,下游仍可激发出不同的瞬变波。

4 结论与讨论

2013—2023 年关中地区多年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度总体呈现下降趋势,在多个年份呈现明显的 10~20 d 季节内波动,反映季节内大气环流对空气质量的显著影响。长周期缓慢移动的大气槽脊结构是导致冬季持续性灰霾的环流背景。关中灰霾发生对应着欧亚大陆中部的低频波负异常,陕西北部 and 内蒙古地区中频波正异常。在冬季气候态上,关中地处东亚西风急流入口区北侧。灰霾天时,关中受对流层热平流影响,南北气温梯度减弱,西风急流减弱。基于准地转理论,急流入口风速减弱将激发非地转的经向次级环流,即急流北侧的上层大气出现北风异常,而地面出现南风异常。同时,关中平原位于高空环流脊前槽后,受反气旋涡度平流影响,高度场有抬升趋势。在这种温度和涡度平流共同作用下,关中地面南风异常、气温偏高、相对湿度偏高、大气边界层高度偏低,出现灰霾天气。相反,清洁天时,关中地区受冷平流影响,南北气温梯度增大、西风急流增强、地面有北风异常,有利于空气污染物扩散。

基于关中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行中频环流分类发现,灰霾天与清洁天分类特征交替出现。由于中频波移动相对缓慢,当大尺度环流异常结构类似欧亚大陆遥相关型负位相,更易于激发并维持有助于灰霾形成的局地次级环流,出现持续性灰霾天气。本文从纬向风强弱角度,关注了局地非地转经向次级环流。深入分析西风急流强度和急流轴位置的年代际-年际-季节内变化,或将有助于更好地理解灰霾事件的多尺度大气动力成因,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 耿冠楠,肖清扬,郑逸璇,等. 实施《大气污染防治行动计划》对中国东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的影响[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(4):469-482.
- [2] 薛涛,刘俊,张强,等. 2013~2017 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(4):441-462.
- [3] 唐贵谦,刘钰婷,高文康,等. 警惕大气污染和碳排放向西北迁移[J]. 中国科学院院刊,2022,37(2):230-237.
- [4] CAI W J, LI K, LIAO H, et al. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(4):257-262.
- [5] WANG H J, CHEN H P, LIU J P. Arctic Sea ice decline intensified haze pollution in eastern China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2015, 8(1):1-9.
- [6] ZOU Y F, WANG Y H, XIE Z W, et al. Atmospheric teleconnection processes linking winter air stagnation and haze extremes in China with regional Arctic sea ice decline[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20:4999-5017.
- [7] YIN Z C, WANG H J. The strengthening relationship between Eurasian snow cover and December haze days in central North China after the mid-1990s[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18:4753-4763.
- [8] SUN J R, LI H Y, ZHANG W J, et al. Modulation of the ENSO on winter aerosol pollution in the eastern region of China[J]. Journal Geophysical Research-Atmosphere, 2018, 123: 11952-11969.
- [9] ZHANG G, GAO Y, CAI W J, et al. Seesaw haze pollution in North China modulated by the sub-seasonal variability of atmospheric circulation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19:565-576.
- [10] ZHAO S, LI J P, SUN C. Decadal variability in the occurrence of wintertime haze in central eastern China tied to the Pacific Decadal Oscillation[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1):1-9.
- [11] PEI L, YANZ W, SUN Z B, et al. Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific Sea surface temperature trends[J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2018, 18: 3173-3183.

-
- [12] XUE L, LOUS J, HUANG X, et al. Subseasonal reversal of haze pollution over the North China Plain [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2023, 16(1):100274.
- [13] AN X D, CHEN W, MA T J, et al. Key role of Arctic sea-ice in subseasonal reversal of early and late winter $\text{PM}_{2.5}$ concentration anomalies over the North China Plain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(4):e2022GL101841.
- [14] CHANG W Y, Zhan J Q. The association of weather patterns with haze episodes: recognition by $\text{PM}_{2.5}$ oriented circulation classification applied in Xiamen, southeastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 197:425–436.
- [15] LYU Z Z, HE S P, LI F, et al. Impacts of the autumn Arctic sea ice on the intraseasonal reversal of the winter Siberian High [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2):173–188.