

赵英珊,张涛,2024.2024 年 3 月大气环流和天气分析[J].气象,50(6):770-776. Zhao Y S, Zhang T, 2024. Analysis of the March 2024 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 50(6):770-776(in Chinese).

2024 年 3 月大气环流和天气分析*

赵英珊 张 涛

国家气象中心,北京 100081

提 要: 2024 年 3 月北半球极涡呈单极偏心型分布,强度偏强;中高纬环流呈异常四波型,亚洲环流较平直。我国北方基本为 500 hPa 高度场负距平区域,西太平洋副热带高压较常年偏西、偏强,南支槽较常年偏弱。全国平均气温为 6.0℃,较常年同期偏高 1.2℃。全国平均降水量 24.0 mm,较常年同期(29.4 mm)偏少 18.4%,然而,内蒙古北部和西北地区中东部降水量较常年同期显著偏多。月内,发生 1 次大范围降雨过程;强对流天气频繁,出现 3 次区域性强对流过程,局地强度强;出现 2 次冷空气过程,降温幅度不大。此外,北方地区出现 3 次沙尘天气过程,西南地区冬春连旱持续。

关键词: 大气环流,强对流,沙尘

中图分类号: P448, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.051101

Analysis of the March 2024 Atmospheric Circulation and Weather

ZHAO Yingshan ZHANG Tao

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The main characteristics of the general atmospheric circulation in March 2024 are as follows. There was one polar vortex center in the Northern Hemisphere, which was stronger than usual. The circulation in mid-high latitudes showed an anomalous four-wave pattern, and the Asian circulation was relatively flat and straight. The northern part of China was basically in a negative anomaly zone of the 500 hPa geopotential height field. The strength of Western Pacific subtropical high was stronger and more westward than in normal years, while the south branch trough was a little weaker than usual. The monthly mean temperature was 6.0℃ across China, which is 1.2℃ warmer than normal. The monthly mean precipitation amount was 24.0 mm, 18.4% less than in normal period (29.4 mm). However, the precipitation in the north of Inner Mongolia and the east of Northwest China was significantly more than that in normal years. During this month, one large-scale precipitation process occurred, and severe convection weather appeared frequently with three regional convection events with strong localized intensities. In addition, there were two cold air processes without causing large range of drop in temperature. Three sand-dust weather processes occurred in northern China, and the drought condition continued in winter and spring in the southwestern region of China.

Key words: atmospheric circulation, severe convection, sand-dust

* 中国气象局青年创新团队(CMA2024QN05)资助

2024 年 4 月 28 日收稿; 2024 年 5 月 15 日收修定稿

第一作者:赵英珊,主要从事强对流天气预报工作. E-mail: zhaoy@s.cma.gov.cn

1 天气概况

1.1 降水

3月,全国平均降水量为24.0 mm,较常年同期(29.4 mm)偏少18.4%。从空间分布来看(图1),降水呈西北—东南阶梯递增分布,东北地区东南部、新疆北部、西北地区中东部至华南地区降水量在25 mm以上,其中江淮、江汉、江南西部、西南地区东部、华南中东部等地降水量达50~100 mm,江南北部和东部、华南北部等地达100~250 mm,全国其余大部地区降水量普遍在25 mm以下。

与常年同期相比(图2),新疆东南部和中部、西北地区中东部及内蒙古东北部、华北西部、西藏南部

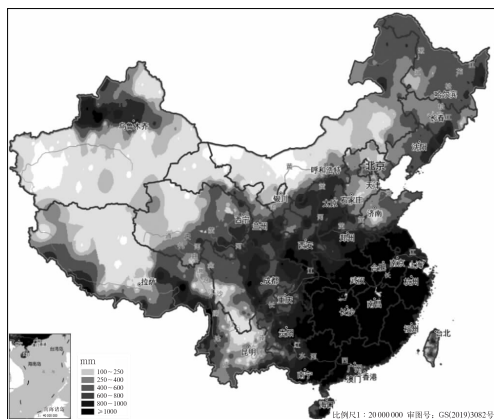


图1 2024年3月全国降水量分布
Fig. 1 Distribution of precipitation over China in March 2024

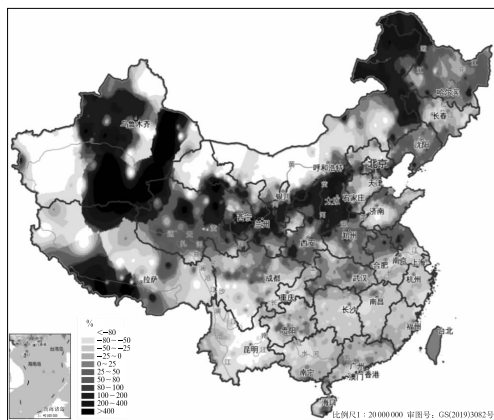


图2 2024年3月全国降水量距平百分率分布
Fig. 2 Distribution of precipitation anomaly percentage over China in March 2024

等地降水量较常年同期偏多5成至1倍,其中新疆东南部和中部、内蒙古东北部、山西大部、陕西北部、甘肃中南部、青海东北部等地偏多1~2倍,部分地区偏多2倍以上。全国其余大部地区降水量接近常年同期到偏少,其中新疆西部、内蒙古中西部、西藏西部和中部、甘肃北部、河北东北部、山东西南部、西南地区中南部等地偏少5~8成,局部偏少8成以上。

1.2 气温

2024年3月,全国平均气温为6.0℃,较常年同期(4.8℃)偏高1.2℃,湖北平均气温为1961年以来历史同期第2高,湖南和云南为第3高(国家气候中心,2024)。全国除内蒙古西北部气温较常年同期偏低1~4℃外,其余大部地区气温接近常年同期或偏高,其中中东部地区、西南地区大部、新疆东北部、内蒙古中西部、西藏中部及甘肃、青海东部等地偏高1~2℃,内蒙古西部、河南中南部、湖北大部、贵州大部、湖南大部、江西中部、云南北部等地偏高2~4℃(图3)。

2 环流特征和演变

图4为2024年3月北半球500 hPa平均位势高度及距平的水平分布,与常年平均相比,北半球环流形势具有以下特点。

2.1 极涡呈单极偏心型分布

与常年3月极涡呈偶极型分布相比(麦子和张

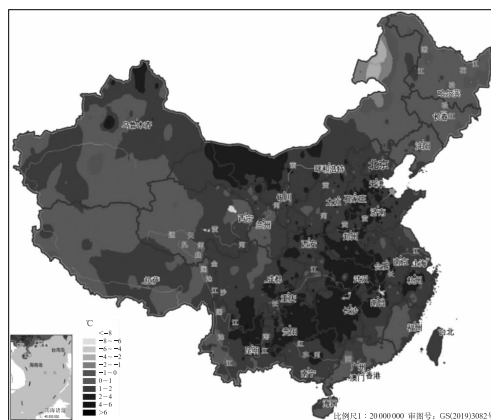


图3 2024年3月全国平均气温距平分布
Fig. 3 Distribution of monthly mean temperature anomaly over China in March 2024

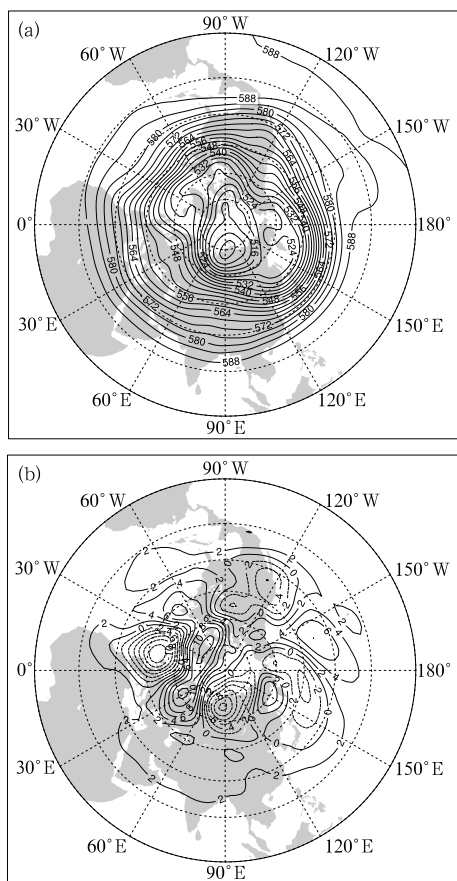


图4 2024年3月北半球500 hPa(a)平均位势高度场和(b)距平场(单位: dagpm)

Fig. 4 (a) Monthly average geopotential height and (b) its anomaly at 500 hPa in the Northern Hemisphere in March 2024 (unit: dagpm)

涛, 2022), 2024年3月极涡呈单极型且异常偏心于东半球(图4a), 中心位于新地岛附近, 位势高度低于504 dagpm, 强度略偏强, 对应距平场为-12 dagpm(图4b)。极涡的异常偏东导致月内我国冷空气活动频繁。

2.2 中高纬环流呈四波型, 副热带高压较常年偏强

3月北半球中高纬500 hPa环流呈四波型分布(图4a), 除常年位于东亚、东欧以及北美的大槽外, 东大西洋也存在一槽。结合距平场(图4b)可见, 受偏南极涡影响, 东欧大槽位置偏东, 位于乌拉尔山附近, 强度明显偏强, 对应超过12 dagpm的负距平; 亚洲中高纬地区除勘察加半岛及其以北地区为2~4 dagpm的正距平外, 从西伯利亚至太平洋西部均为负距平区, 东亚大槽略偏深、偏强。由于乌拉尔山高压脊被槽替代, 亚洲中高纬度环流较为平直, 缺少

阻塞高压的建立与崩溃作用来堆积冷空气并引导南下, 导致月内我国冷空气过程虽偏多但强度不强, 整体气温偏高。

低纬地区普遍表现为2~6 dagpm的正距平, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)与南支槽区域均为2 dagpm左右的正距平, 较常年明显偏强。南支槽位于90°E附近, 与同期相当, 其东移配合副高外围的偏西气流有利于暖湿气流北上, 与北方偏强的东亚大槽引导南下的冷空气在黄淮及其以北地区交汇, 导致3月江淮北部、黄淮、西北地区东部降水显著偏多。

2.3 环流演变与我国天气

图5分别给出了3月上、中、下旬欧亚地区的500 hPa旬平均位势高度场分布。

上旬(图5a), 极涡明显偏向于欧亚大陆北部, 中心强度低于512 dagpm。我国新疆至贝加尔湖地区存在一较为宽阔的浅脊, 欧亚大陆中高纬呈“西低东高”的环流形势。这种环流形势不利于强冷空气堆积, 导致上旬冷空气过程虽然频繁但强度不强; 东亚大槽偏东、偏强, 我国北方地区环流呈“西高东低”, 不利于降水发展, 同时造成东部大部分地区气温较往年相当或略低。低纬地区南支槽位于70°E附近, 位置明显偏西, 强度较弱, 不利于暖湿气流向我国输送, 配合较深的东亚大槽, 冷暖空气对峙位置明显偏南, 造成华南地区降水偏多, 局地出现大到暴雨天气。庞大的大陆高压脊导致蒙古国和我国西北地区偏暖, 有利于地表解冻, 使得沙源地土质疏松, 为中、下旬频发的沙尘天气提供了沙尘源。

中旬(图5b)环流形势有所调整, 极涡强度加强并且向东发展, 乌拉尔山附近转为高压脊, 东亚大槽继续东移。欧亚大陆上空以纬向环流为主, 多短波槽活动, 导致旬内我国冷空气势力不强, 中东部大部分地区气温较同期偏高。南支槽加强发展, 位置略有东移, 但与常年相比仍明显偏西。暖湿气流北上条件略好, 但由于缺少南下冷空气, 华北、黄淮以及江淮部分地区降水较同期显著偏少, 江南和华南地区略偏少。

下旬(图5c), 东亚大槽减弱, 但随着极涡减弱北收, 乌拉尔山高压脊加深发展, 导致亚洲中高纬环流“西高东低”, 中纬度多短波槽活动, 冷空气活跃但不强, 主要影响长江中下游及其以北地区, 气温偏高的趋势有所减缓。南支槽偏东、偏深, 同时副高北抬,

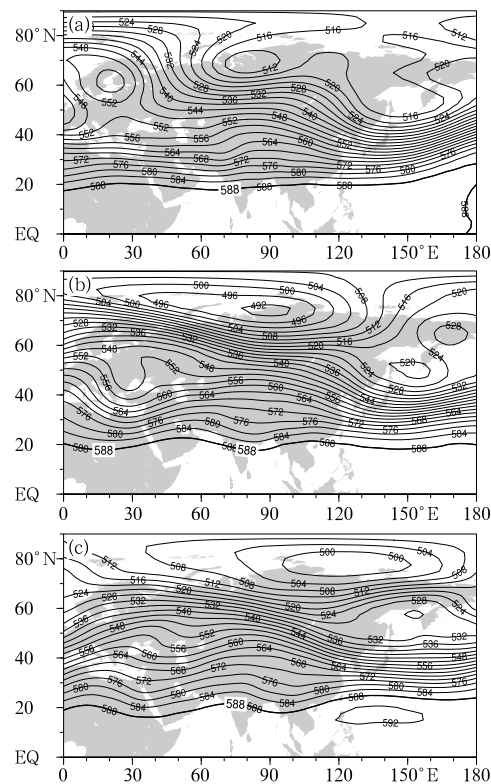


图 5 2024 年 3 月(a)上旬、(b)中旬、(c)下旬 500 hPa 平均位势高度场(单位:dagpm)

Fig. 5 Average geopotential height at 500 hPa in the (a) first, (b) second, and (c) third dekads of March 2024 (unit: dagpm)

中心强度大于 592 dagpm,有利于暖湿气流北上。因此,活跃但偏弱的冷空气与较强的暖湿气流交汇区域显著偏北,黄淮、江淮北部以及西北地区等地降水量较同期偏多 8 成至 2 倍。南方大部多晴好天气,热辐射作用导致气温显著偏高,江南中西部地区气温较同期偏高 6℃以上。另外,南支槽活跃,暖湿气流偏强也有利于江南地区对流不稳定能量的积累,旬内多次出现区域性强对流天气过程。

3 主要降水和强对流过程

3.1 概 况

3 月我国主要出现 1 次暴雨过程(表 1)和 3 次区域性强对流过程(表 2),强对流过程次数相较于常年同期偏多,且均发生在下旬,局地强度强。其中,30—31 日,江南大部及华南北部出现强对流天气,短时强降水局地达 80 mm · h⁻¹,局地伴有风雹,湖南、江西等地出现 8~10 级雷暴大风,局地达 11 级以上,造成江西多人伤亡(国家气候中心, 2024)。

3.2 3 月 30—31 日江西强对流过程

受南支槽和低涡切变影响,3 月 30—31 日江南

表 1 2024 年 3 月主要降水过程

Table 1 Main precipitation processes in March 2024

时段	主要影响系统	影响区域及强度
3 月 30 日至 4 月 3 日	南支槽、低空急流、低涡切变	江南、江汉、西南地区东部、华南北部等地累计降水量 50~100 mm,江南及重庆等地 150~200 mm,福建三明,江西赣州、吉安、宜春、南昌、上饶、景德镇,湖南岳阳、长沙、株洲等地部分地区 250~300 mm,江西上饶、宜春、吉安、赣州局地 310~332 mm

表 2 2024 年 3 月主要强对流过程

Table 2 Main convective weather processes in March 2024

时段	主要影响系统	影响区域及强度
22—25 日	南支槽、切变线	西南地区东部、江淮、江南大部地区先后出现大范围风雹降水混合型强对流天气,其中,25 日午后在江西北部、福建西北部、浙江等多地出现大范围风雹天气,局地出现瞬时风力达 12~13 级的雷暴大风和直径达 2~4 cm 以上的大冰雹;过程最大小时降水出现在 25 日湖北荆州八宝镇,达 68.6 mm · h ⁻¹
27—28 日	锋面	27 日下午,江南大部出现大范围大风降水混合型强对流天气,局地伴有冰雹,夜间湖南、江西等地对流较强,瞬时风力达 9~11 级,并伴有 20~50 mm · h ⁻¹ 的短时强降水
30—31 日	低涡切变	江南大部、华南北部等地出现风雹降水混合型强对流天气,短时强降水约 30~50 mm · h ⁻¹ ,局地达 80 mm · h ⁻¹ ,局地伴有风雹,湖南、江西等地雷暴大风 8~10 级,局地达 11 级以上

和华南北部出现大范围短时强降水和风雹强对流天气,其中江西受强飑线和超级单体影响,受灾严重,过程主要时段在30日夜间至31日上午(北京时,下同),全省最大累计降水量为106.9 mm,最大小时雨强为 $64.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,有6个站出现小冰雹。区域性大风集中于30日午夜至31日早晨,赣北南部最多,8~10级阵风分别有26、17、6个站次,11级以上2个站次。其中南昌市有53%的站点极大风速超过8级,6%超过11级,大风站数之多,范围之广,为南昌市有完整气象记录以来历史罕见;最大阵风风速为 $35.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级),是有气象记录以来的第二大风速。

从环流形势来看,此次过程发生在高空短波槽过境,冷涡南侧冷空气东移,低空暖湿急流向北输送的环流背景下(图6)。30日08:00,500 hPa四川中东部存在短波槽,随着短波槽东移,850 hPa低空急流东移北上,暖湿舌明显向北移动,江淮地区南部整层可降水量在20 mm以上。受高空槽前正涡度平流和低层暖平流影响,08:00,850 hPa上四川至贵州地区生成低涡,其东侧暖式切变线从重庆南部延伸至湖南西北部,切变线南侧低空急流携带孟加拉湾暖湿空气影响江西中部和南部地区。同时850 hPa上在湖北和江西南部分别存在一暖中心,强度分别为 18°C 、 16°C ,与500 hPa冷槽形成下暖上冷结构。30日白天江西大部为晴天,升温增能效果强,午后中南部有降水发展,夜间水汽北抬,增湿效果明显。30日20:00,850 hPa低涡东移发展,在低空急流出口区的湖南西北部发展为江淮气旋(沈阳等,2019),其暖式切变线影响赣北地区。江西大部850 hPa和500 hPa温度差在 $26\sim 28^{\circ}\text{C}$,江西西北部在 28°C 以上,20:00南昌站探空显示(图7),CAPE达 $1893 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有很强的热力不稳定能量,0~3 km和0~6 km垂直风切变分别为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于对流组织化发展。水汽场上,整层可降水量为34 mm,相对湿度垂直分布非明显的上干下湿,但对流层中层相对湿度仅20%,有利于干空气夹卷进对流系统造成降水粒子蒸发吸热进而加剧雷暴大风。同时0~1 km垂直风切变较大,抬升凝结高度低,有利于雷暴大风的出现。

31日02:00,高空短波槽移至江西,槽底位于南昌附近,槽前低层暖式切变线位于湖北东部至安徽南部,南昌仍处于低层暖区,并即将转为高空槽后冷区。31日02:06华中地区雷达拼图显示江西中北

部对流线形态清晰(图8),槽后的中层西北干冷急流不仅引导强飑线东移,而且有利于干空气夹卷进入超级单体(公衍铎等,2019)。中层偏西干冷急流与槽前的低层偏南气流在江西北部的耦合配置,也有利于飑线中形成中尺度涡旋。从地面逐10 min

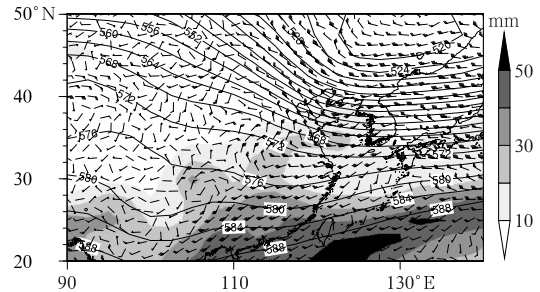


图6 2024年3月30日08:00 500 hPa位势高度场(等值线,单位:dagpm)、850 hPa风场(风羽)和整层可降水量(阴影)

Fig. 6 Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: dagpm), wind field (barb) at 850 hPa and PWAT (shaded) at 08:00 BT 30 March 2024

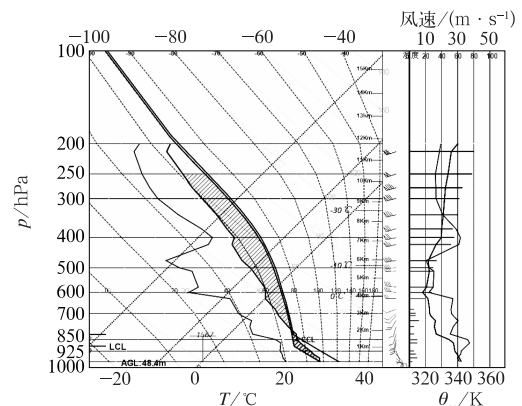


图7 2024年3月30日20:00南昌站探空曲线
Fig. 7 T-lnp diagram of Nanchang Sounding Station at 20:00 BT 30 March 2024

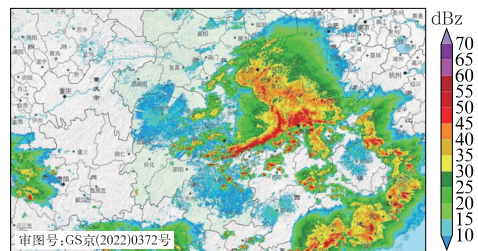


图8 2024年3月31日02:06华中地区雷达组合反射率因子

Fig. 8 Radar composite reflectivity in Central China at 02:06 BT 31 March 2024

极大风来看,31 日 02:50 前后湖南东部有一个非常明显的涡旋形成并向东移动。在雷达回波上显示出一明显的强中尺度涡旋,涡旋最强风直径约 4~8 km,西侧中层有急流侵入并向东北流出,对应高空槽后的西北风环流背景。最强风在涡旋西南侧旋转下沉,于 02:54 之后造成灾害,江西多地农作物受灾绝收,多人受伤或殒命,直接经济损失逾千万元。

4 冷空气活动和沙尘天气

4.1 冷空气过程频繁,总体势力较弱

3 月我国共出现 2 次影响较大的冷空气过程,分别发生于 15—18 日、23—25 日,次数接近常年同期(国家气候中心,2024),具体见表 3。其中,15—18 日过程具有降温幅度较大,影响范围广等特点,我国中东部大部地区最大降温幅度超过 6℃,其中东北地区北部、内蒙古中部和北部降温 10~12℃,

内蒙古中部局地降温超 12℃。由于我国大部地区中旬前期气温明显偏高,而此次过程降温幅度较大,多地形成快速冷暖逆转。

4.2 北方大部沙尘天气偏多

3 月,受蒙古气旋和地面冷锋共同影响,我国北方地区先后出现 3 次沙尘天气过程,分别发生于 3 月 14—17 日、3 月 27—29 日、3 月 31 日至 4 月 2 日(表 4),其中 3 月 27—29 日为沙尘暴过程,新疆南部、内蒙古中东部、京津冀大部、东北地区西部等地出现扬沙或浮尘天气,内蒙古中东部、河北北部等地出现沙尘暴或强沙尘暴;3 月 31 日至 4 月 2 日为强沙尘暴过程,新疆东部和南部、甘肃、宁夏、内蒙古中西部及山西等地出现扬沙或浮尘天气,新疆南部出现沙尘暴或强沙尘暴天气。过程次数略少于 2000—2023 年同期平均值(3.5 次)(国家气候中心,2024),沙尘天气强度略逊于 2023 年同期(尹志聪等,2023)。

表 3 2024 年 3 月主要冷空气过程

Table 3 Main cold air processes in March 2024

时段	强度	影响区域及大风、降温
15—18 日	较强冷空气	江南及其以北大部地区气温下降 4~8℃,局地 10℃以上,北方地区伴有 4~6 级偏北风,阵风 7~9 级,新疆山口风力达 10~11 级
23—25 日	中等	长江中下游及其以北大部地区出现 4~6℃降温,部分地区降温 8~10℃,偏北风 4~5 级,阵风 6~8 级

表 4 2024 年 3 月主要沙尘过程

Table 4 Main sand-dust weather processes in March 2024

时段	主要影响系统	过程类型	影响区域
3 月 14—17 日	蒙古气旋、地面冷锋	扬沙	新疆东部和南疆盆地、内蒙古、青海北部、甘肃、宁夏、陕西中北部、山西、河北北部、北京、河南西部、山东中东部、辽宁中北部、吉林南部、四川盆地中部等地出现扬沙或浮尘天气,新疆南疆盆地、内蒙古中西部偏北地区、甘肃北部等地出现沙尘暴,新疆民丰、若羌局地出现强沙尘暴
3 月 27—29 日	蒙古气旋、地面冷锋	沙尘暴	新疆南部、内蒙古中东部、陕西北部、山西北部、北京、天津、河北大部、山东大部、河南北部、黑龙江西部、吉林西部、辽宁西部等地有扬沙或浮尘天气,内蒙古中东部、河北北部的部分地区有沙尘暴,内蒙古二连浩特、朱日和、苏尼特右旗、锡林浩特、克什克腾旗、林西、巴林右旗、翁牛特旗、阿鲁科尔沁旗等地强沙尘暴
3 月 31 日至 4 月 2 日	地面冷锋	强沙尘暴	新疆东部和南部、青海柴达木盆地、甘肃河西、内蒙古西部、宁夏等地出现扬沙或浮尘天气,其中新疆南部出现沙尘暴,喀什、于田、塔中、且末、若羌等地出现强沙尘暴

总体来看,3 月我国西北地区温度显著偏高,而中旬偏暖尤其明显,有利于沙源地土壤解冻,配合极涡位置偏南带来的冷空气影响,为沙尘天气的出现提供了有利条件。

14—17 日地面冷锋及蒙古气旋东移,我国西北至华北一带出现沙尘过程,内蒙古中部、宁夏中北

部、陕西北部、山西北部、河北北部、北京北部等地有扬沙或浮尘,内蒙古中部局地有沙尘暴。此次过程于 14 日起沙,热低压加上地形条件,新疆、内蒙古西部和甘肃地区受较大西南风影响,形成了以本地沙源为主的沙尘天气,随后系统加强发展并东移,影响华北地区。环流背景场显示(图 9),16 日 02:00

500 hPa 上中亚低槽东移至我国新疆西北部地区,地面上 15 日生成的蒙古气旋已移动至内蒙古东部,中心气压接近 1000 hPa。由于冷高压主体位于哈萨克斯坦东部至我国新疆地区,较强的西北气流将蒙古国沙尘经西北路径裹挟南下,在本地起沙基础上汇入了上游沙源(张璐等,2022),导致西北地区沙尘天气迅速发展。随着高空西风槽东移,地面蒙古气旋发展加强,冷高压与气旋之间气压梯度加大,有利于大风增强,内蒙古东部、华北地区于 16 日白天出现扬沙天气,并于中午影响北京。午后气旋和冷高压系统快速向东移动、强度减弱,沙尘天气开始影响辽宁、吉林等地,对京津冀的影响减弱。

5 其他灾害性天气——西南地区冬春连旱持续

2024 年以来,受气温偏高、降水偏少影响,西南地区冬春连旱持续,平均气象干旱日数为 23.7 d,

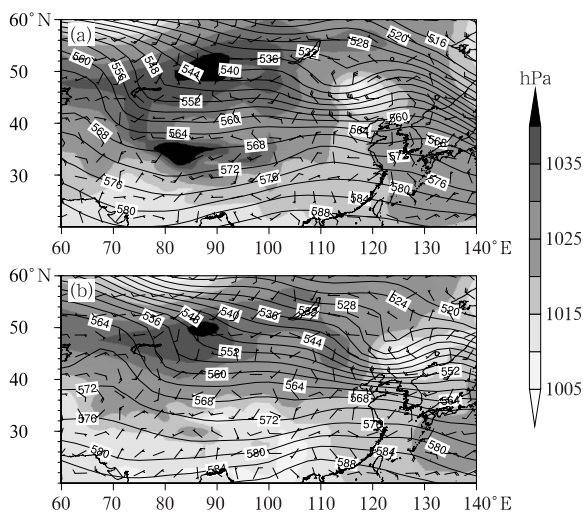


图9 2024年3月16日(a)02:00,(b)14:00 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)、10 m 风场(风羽)和海平面气压场(阴影)

Fig. 9 Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: dagpm), 10 m wind field (barb) and sea level pressure (shaded) at (a) 02:00 BT and (b) 14:00 BT 16 March 2024

较常年同期偏多 10.6 d,为 1961 年以来历史同期第 8 多。其中云南平均气象干旱日数为 22.3 d,较常年同期偏多 7 d。截至 3 月底,此次西南气象干旱过程综合强度、持续时间、最大影响范围均不及 2010 年、2013 年、2023 年同期。云南东部、贵州西部和北部、四川东南部等地存在中至重度气象干旱,四川盆地、四川西部和南部、云南中部、贵州西南部和西北部、河北中北部、内蒙古中部等地 20 cm 土壤轻至重度缺墒(国家气候中心,2024)。

参考文献

- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J]. 气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4):483-495(in Chinese).
- 国家气候中心,2024. 2024 年 3 月中国气候影响评价[R/OL]. https://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php. National Climate Centre, 2024. Assessment of climate impact over China in March 2024[R/OL]. https://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php(in Chinese).
- 麦子,张涛,2022. 2022 年 3 月大气环流和天气分析[J]. 气象,48(6):794-800. Mai Z, Zhang T, 2022. Analysis of the March 2022 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 48(6):794-800(in Chinese).
- 沈阳,孙燕,蔡凝昊,等,2019. 一次引发极端降水事件的江淮气旋发生发展分析[J]. 气象,45(2):166-179. Shen Y, Sun Y, Cai N H, et al, 2019. Analysis on the generation and evolution of a Jianghuai cyclone responsible for extreme precipitation event[J]. Meteor Mon, 45(2):166-179(in Chinese).
- 尹志聪,霍芊伊,麻晓晴,等,2023. 触发 2023 年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制[J]. 大气科学学报,46(3):321-331. Yin Z C, Huo Q Y, Ma X Q, et al, 2023. Mechanisms of dust source accumulation and synoptic disturbance triggering the 2023 spring sandstorm in northern China[J]. Trans Atmos Sci, 46(3):321-331(in Chinese).
- 张璐,宋桂英,范凡,等,2022. 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,42(9):351-363. Zhang L, Song G Y, Fan F, et al, 2022. Diagnosis of sandstorm weather process and analysis of sand pollution transportation in northern China from 14th to 16th, March 2021[J]. Acta Sci Circumstantiae, 42(9):351-363(in Chinese).

(本文责编:张芳)