



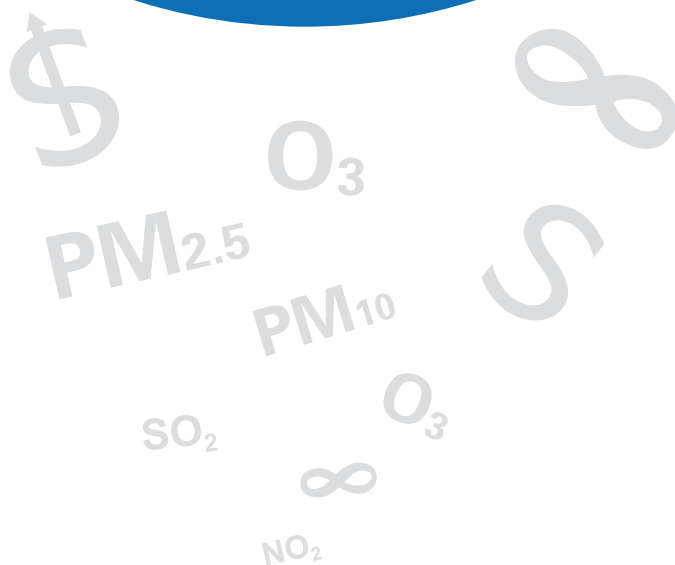
中国气象局

CHINA METEOROLOGICAL ADMINISTRATION



大气环境 气象公报

(2021年)



中国气象局

编写组名单

顾 问：

中国气象科学研究院：徐祥德

编写人员：

国家气象中心：王继康 张碧辉 桂海林 安林昌 花 丛

刘 超 尤 媛 徐 冉 迟茜元 南 洋

饶晓琴 马 杰 赵彦哲

中国气象局气象探测中心：娄梦筠 荆俊山 贾小芳 靳军莉 张 勇

国家卫星气象中心：高 玲 闫欢欢 张倩倩 刘旭艳 吴荣华

陈 洁 张晔萍 孙瑞静

中国气象科学研究院：刘洪利 龚山陵

国家气候中心：曾红玲 叶殿秀 袁 媛

目 录

摘 要.....	1
第一部分 全国大气环境	2
1.1 概述.....	2
1.2 能见度、霾及沙尘天气.....	4
1.2.1 能见度	4
1.2.2 霾	4
1.2.3 沙尘天气.....	9
1.3 大气颗粒物浓度.....	16
1.3.1 PM ₁₀ 浓度	16
1.3.2 PM _{2.5} 浓度	17
1.4 反应性气体	19
1.4.1 地面臭氧浓度.....	19
1.4.2 对流层臭氧总量	20
1.4.3 NO ₂ 对流层总量和 SO ₂ 柱总量.....	22
1.5 酸雨.....	24
1.5.1 现状.....	24
1.5.2 长期变化.....	25
附表 1.1 2021 年全国和重点区域大气环境分析表	26
第二部分 全国大气污染气象条件	27
2.1 概述.....	27
2.2 PM _{2.5} 污染气象条件	27
2.2.1 冷空气	27
2.2.2 风速和小风日数	28
2.2.3 相对湿度.....	32
2.2.4 有效降水日数.....	34
2.2.5 混合层高度	35
2.2.6 冬季静稳天气指数	37
2.2.7 PM _{2.5} 污染气象条件综合评估	38
附表 2.1 2021 年全国和重点区域 PM _{2.5} 污染气象条件分析表	41
2.3 臭氧污染气象条件	42
2.3.1 降水日数.....	42
2.3.2 辐射	43
2.3.3 高温	44
2.3.4 臭氧污染气象条件小结	46
附表 2.2 2021 年全国和重点区域臭氧污染气象条件分析表	47
2.4 沙尘天气气象条件	48
2.4.1 冷空气大风	48
2.4.2 降水量	49
2.4.3 沙源地积雪	50
2.4.4 沙尘天气气象条件小结	51
第三部分 结论.....	52

摘要

大气环境气象公报（2021 年）分析了 2021 年全国大气环境和大气污染气象条件相对于 2020 年及近 5 年平均情况的变化。

2021 年全国大气环境继续改善。2021 年全国平均霾日数为 21.3 天，较 2020 年和近 5 年平均分别减少 2.9 和 6.9 天。全国出现 6 次大范围霾天气过程，较 2020 年和近 5 年平均分别减少 1.0 和 1.2 次。中国环境监测总站数据显示，2021 年全国地面 PM_{2.5} 和臭氧平均浓度分别较 2020 年下降 9.1% 和 0.7%。但是，2021 年沙尘天气偏多偏强，我国共出现了 13 次沙尘天气过程，较 2020 年偏多 3 次，较近 5 年平均偏多 0.8 次。

2021 年北方地区大气污染气象条件偏有利，南方地区大气污染气象条件偏不利。2021 年，全国平均气象条件可使 PM_{2.5} 浓度与 2020 年基本持平，较近 5 年平均下降 3.3%。2021 年，京津冀等北方区域受冷空气偏强、风速偏大等影响，气象条件可使 PM_{2.5} 浓度较 2020 年下降 2-6%；受 5-9 月降水日数偏多、高温和辐射偏弱等影响，气象条件较 2020 年有利于臭氧浓度下降。2021 年，珠三角等南方区域受有效降水日数偏少、风速偏小等影响，气象条件可使 PM_{2.5} 浓度较 2020 年升高 3-10%；受 5-9 月辐射和高温偏强等影响，气象条件较 2020 年不利于臭氧浓度下降。

2021 年气象条件有利于沙尘天气偏多偏强。2021 年，影响我国的主要沙源地受冷空气偏强、大风日数偏多、积雪覆盖面积偏少等影响，气象条件较 2020 年有利于沙尘天气的偏多偏强。

2000 年以来，我国大气环境整体呈现前期转差后期向好趋势。全国大部分地区霾日数由上升转为下降，但冬季持续性、大范围霾天气过程时有发生。东部地区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度下降趋势明显。2000 年至 2007 年全国酸雨污染恶化，2008 年以来酸雨污染状况持续改善。

第一部分 全国大气环境

1.1 概述

大气环境是指生物赖以生存的大气物理和化学特性，与人类生存密切相关，主要包括空气的温度、湿度、风速、气压、降水及大气中氮气、氧气、二氧化碳、反应性气体、大气颗粒物等。大气环境变化导致的低能见度、霾、沙尘天气、酸雨及光化学烟雾等问题，影响人类的健康和生活，受到较大的关注。

2021 年全国平均霾日数为 21.3 天，较 2020 年减少 2.9 天，较近 5 年平均减少 6.9 天。全国大部分地区霾日数持续下降。全国出现 6 次大范围霾天气过程，较 2020 年减少 1 次。2000 年以来，全国霾天气过程次数呈现先上升再下降后趋于平稳的变化趋势，2013 年达到峰值（15 次），2018 年以来趋于稳定。

2021 年我国共出现 13 次沙尘天气过程，较 2020 年偏多 3 次，较近 5 年平均偏多 0.8 次。北方大部地区沙尘天气日数较近 5 年平均偏多超过 10 天。2000 年以来，沙尘天气过程次数呈现先减少后增加的趋势，沙尘暴天气过程次数显著减少。

中国环境监测总站监测数据显示，2021 年全国 PM_{2.5} 平均浓度较 2020 年下降 9.1%，较 2016 年下降 28.6%。2021 年全国臭氧平均浓度较 2020 年下降 0.7%，较 2016 年上升 8.7%。

卫星监测显示，2021 年全国大部分地区臭氧对流层总量和 NO₂ 对流层总量均较 2020 年有所增加。中国气象局酸雨监测显示，全国大部地区酸雨持续改善，平均降水 pH 值和酸雨频率保持了近年来酸雨持续改善的较好水平。

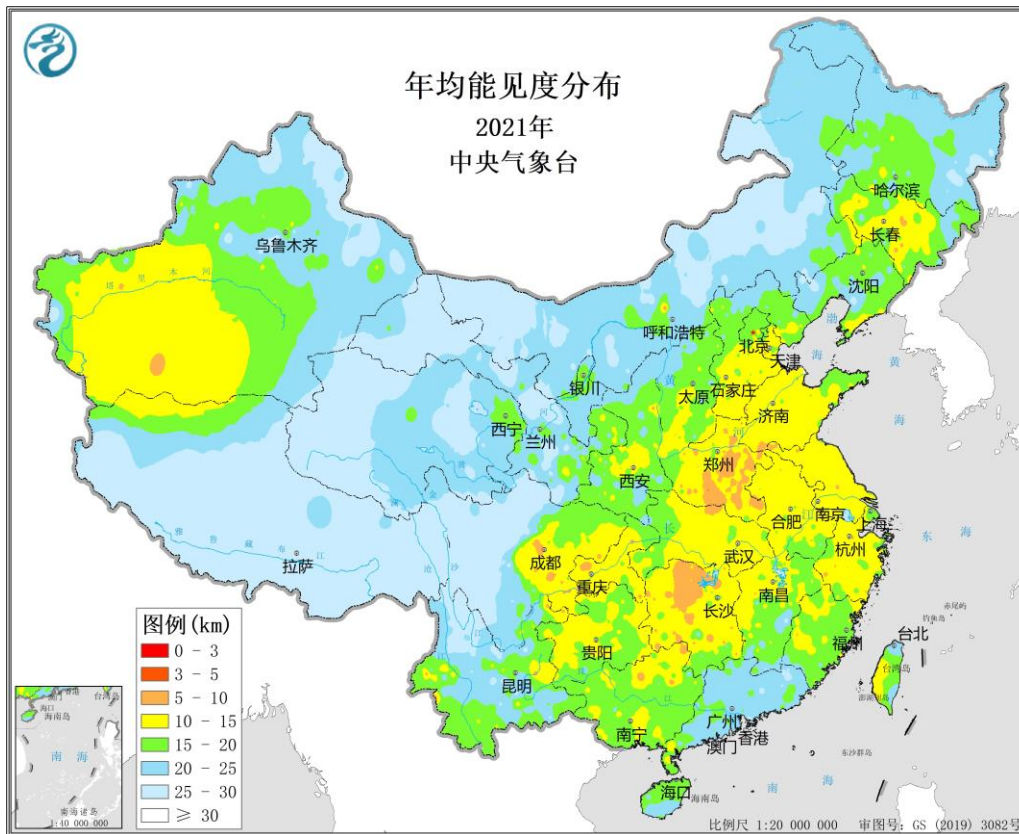
1.2 能见度、霾及沙尘天气

1.2.1 能见度

地面水平能见度受气溶胶和相对湿度影响大。2021 年全国平均能见度为 17.1 公里，略低于 2020 年（17.2 公里），但较近 5 年平均偏高。

1.2.1.1 现状

2021 年全国平均能见度为 17.1 公里，略低于 2020 年（17.2 公里），但较近 5 年平均偏高。冬季平均能见度为 15.1 公里，明显高于 2020 年同期（13.8 公里）。2021 年，京津冀、汾渭平原和珠三角区域平均能见度与 2020 年基本持平，长三角区域平均能见度较 2020 年偏高 1 公里左右。



1.2.1.2 长期变化

全国 08 时（北京时）能见度月均值时序变化图显示，从 2011 年开始，冬季能见度明显降低，2017 年起转为升高趋势。2006 年 1 月、2013 年 1 月、2014 年 2 月、2015 年 12 月、2016 年 12 月、2017 年 1 月、2018 年 11 月、2020 年 1 月是能见度相对较低月份，都出现了持续性大范围雾、霾天气过程，其中

2016 年 12 月平均能见度 (10.7 公里) 为 2000 年以来最低。

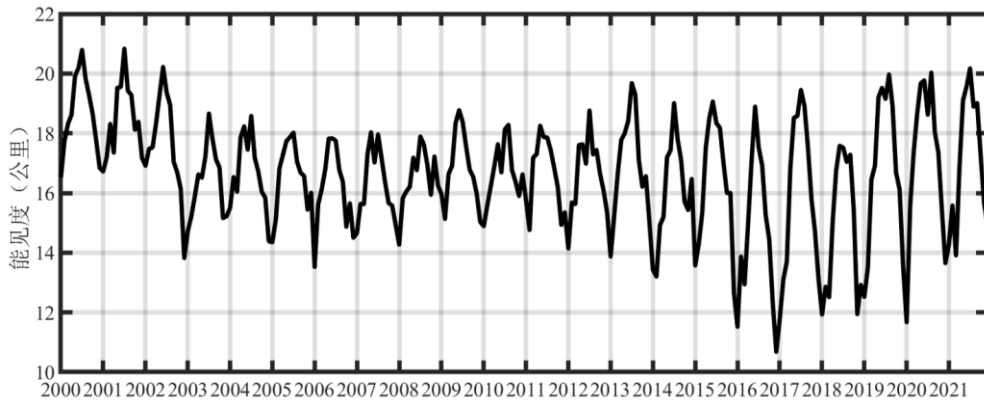


图 1.2 2000 年以来全国 08 时逐月平均能见度

1.2.2 霾

2021 年全国共出现 6 次大范围霾天气过程, 较 2020 年减少 1 次; 平均霾日数为 21.3 天, 较 2020 年减少 2.9 天。

1.2.2.1 现状

(1) 霾天气过程

2021 年全国共出现 6 次大范围霾天气过程, 较 2020 年减少 1 次, 较 2016 年减少 5 次, 较近 5 年平均减少 1.2 次。2021 年霾天气过程主要发生在京津冀及周边和汾渭平原区域。2021 年共发生轻度霾过程 1 次、中度霾过程 3 次、重度霾过程 2 次。

2021 年 1 月 21 日至 27 日过程为 2021 年最重霾天气过程 (图 1.3)。主要表现为: 时间最长, 持续 7 天; 强度最强, 山东中西部、河南大部、河北南部、辽宁南部等地出现大范围的重度霾天气, 其中 1 月 24 日开封市 $PM_{2.5}$ 日均浓度为 $311\mu g/m^3$, 能见度低于 3km; 影响范围最广, 对我国中东部大部地区产生影响, 影响面积达 110 万平方公里。持续不利的气象条件是导致本次最强霾天气过程发生的主要外因。本次霾天气过程中, 我国中东部位于冷高压前部, 受均压场控制, 地面湿度高, 风速小, 夜间至清晨时段伴有雾天气。

2021 年 3 月至 4 月, 云南西南部城市出现持续性霾天气过程。每年 3 月至 4 月为云南地区主要的霾天气发生时段, 以西双版纳景洪市为例, 2021 年景洪市霾日数共计 12 天, 均出现在 3 月中旬至 4 月上旬。东南亚国家大面积的生物物质燃烧产生的大气污染物跨境传输是造成 3 月至 4 月云南西南部城市持续性霾

天气过程的主要原因。利用多源卫星分钟级监测显示，云南周边东南亚国家在 3 月至 4 月期间获取火点的观测数为 96091 次*，占全年火点观测数的 80%。以 3 月 28 日为例，云南周边东南亚国家监测到大量生物质燃烧火点（图 1.4），由生物质燃烧产生的大量污染物在风场作用下，传输至我国云南地区，造成云南西南部城市霾天气的发生。

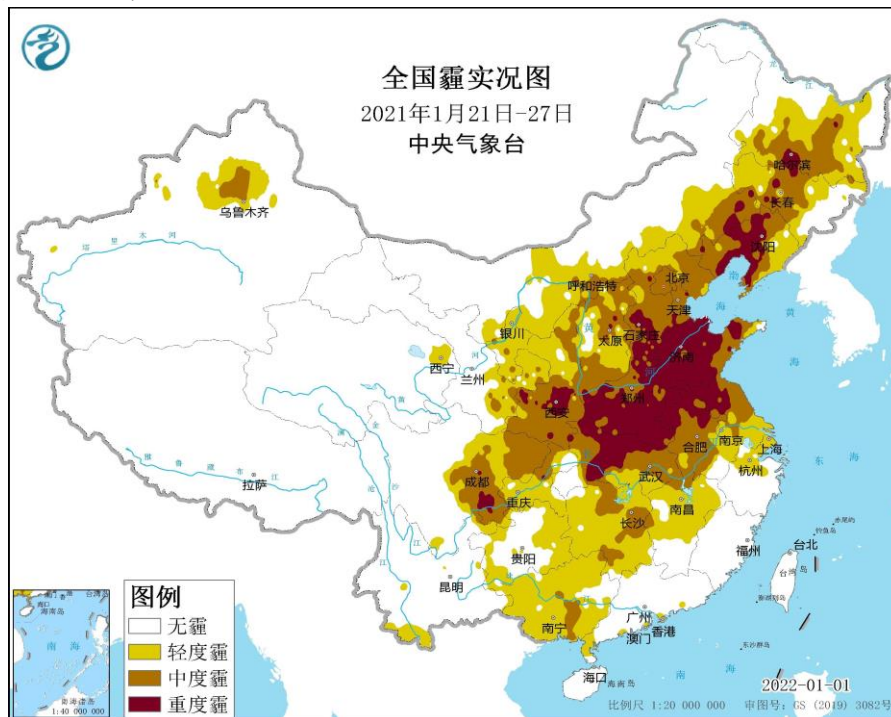


图 1.3 2021 年 1 月 21 日至 27 日霾天气过程实况分布

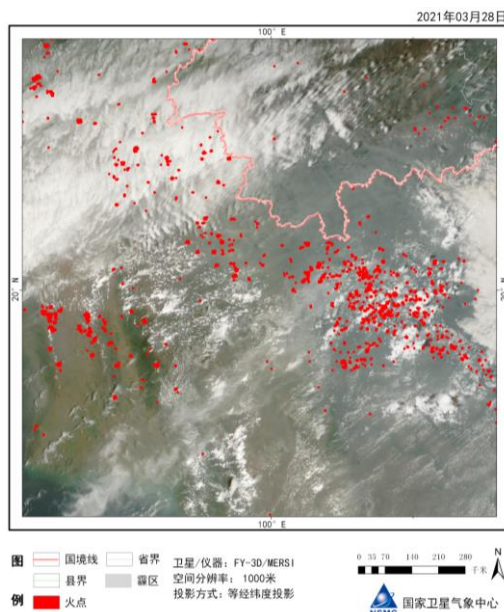


图 1.4 2021 年 3 月 28 日我国云南西南部及周边国家卫星真彩色叠加火点监测

* 观测数=Σ火点数*观测频次。

(2) 霾日

2021年霾日数较多的区域主要集中于京津冀及周边、汾渭平原等地，其中河南中东部、山东中西部等地超过40天。全国大部地区霾日数较2020年和近5年平均明显减少。

全国：2021年平均为21.3天，较2020年减少2.9天，较2016年减少16.6天，较近5年平均减少6.9天。

京津冀：2021年平均为31.7天，较2020年减少6.8天，较2016年减少28.7天，较近5年平均减少19.1天。

汾渭平原：2021年平均为35.2天，较2020年减少8.8天，较2016年减少49.2天，较近5年平均减少25.8天。

长三角：2021年平均为20.9天，较2020年减少5.6天，较2016年减少49.9天，较近5年平均减少23.2天。

珠三角：2021年平均为2.1天，较2020年增加0.1天，较2016年减少7.3天，较近5年平均减少3.4天。

其他区域：全国大部区域霾日数较2020年明显下降。

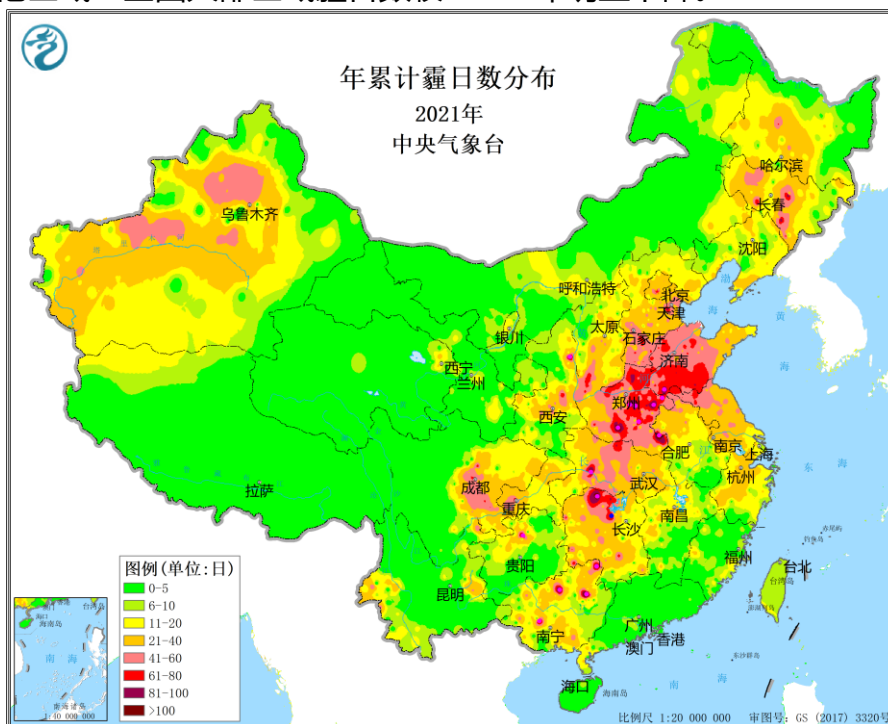


图 1.5 2021 年全国霾日数分布

表 1.1 2021 年霾天气过程纪要表

编号	起止时间	过程强度	主要影响区域
202101	1 月 21-27 日	重度	陕西关中、山西、河南、山东、河北、北京、天津、湖北、江苏、安徽、辽宁中西部
202102	2 月 10-14 日	重度	北京、天津、河北、河南、陕西关中、山西、四川、辽宁
202103	3 月 9-12 日	中度	北京、天津、河北、山东北部、辽宁南部
202104	11 月 4-6 日	中度	北京、河北、天津、山东、河南、辽宁南部、陕西关中
202105	11 月 16-19 日	轻度	山东、河南、河北、北京、天津、陕西关中、山西、辽宁、安徽北部
202106	12 月 9-11 日	中度	北京、天津、河北、山东、河南、陕西关中、山西、江苏、安徽、湖北、湖南

(注:相邻三个及以上省大部分地区持续三天及以上出现霾天气记为一次霾天气过程*)

* 参照《霾天气过程划分》(QX/T 513—2019)

1.2.2.2 长期变化

(1) 霾天气过程

2000 年以来，全国霾天气过程次数呈现先上升再下降后趋于平稳的变化。2000 年至 2013 年呈上升趋势，2013 年达到峰值（15 次）；此后至 2017 年呈下降趋势；2017 年至 2021 年霾天气过程基本稳定在 5-7 次，受气象条件变化略有波动。

(2) 霾日

全国及重点区域平均霾日数长期变化趋势均呈现先上升后下降的趋势。各重点区域霾日数转为下降的时间存在差异。全国平均霾日数自 2016 年开始明显下降，珠三角自 2012 年开始明显下降，京津冀和长三角区域自 2014 年开始明显下降，汾渭平原自 2015 年开始明显下降。

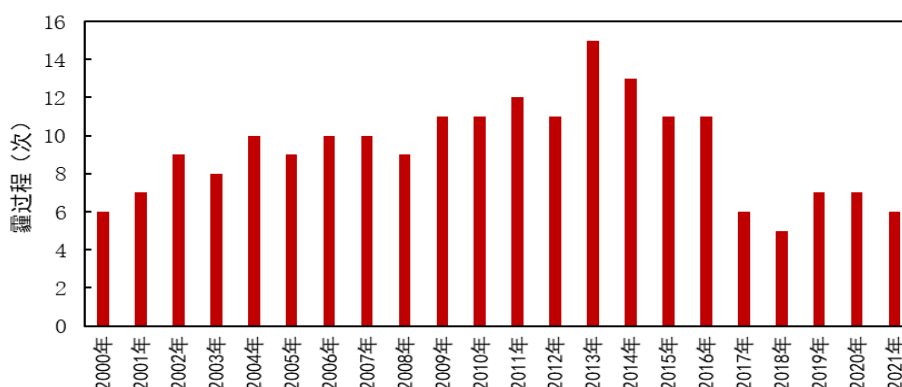


图 1.6 2000 年至 2021 年全国霾天气过程次数

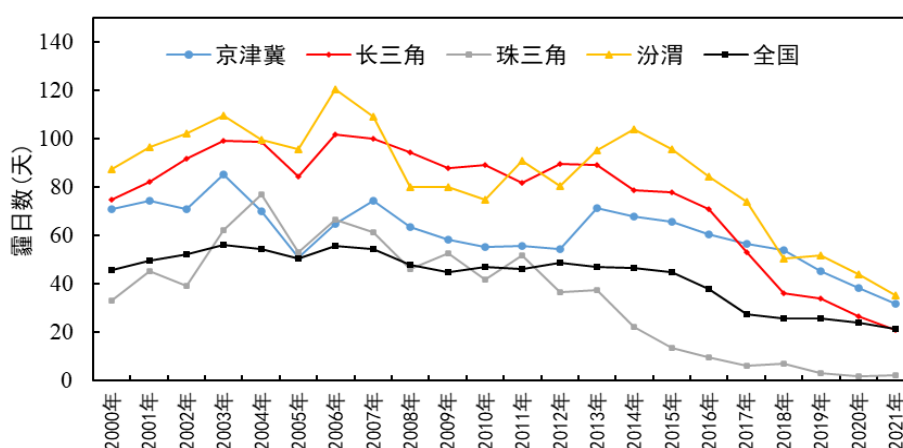


图 1.7 2000 年至 2021 年全国及重点区域霾日数

1.2.3 沙尘天气

2021年我国共出现了13次沙尘天气过程，较2020年（10次）偏多3次，较近5年平均（12.2次）偏多0.8次。2021年沙尘过程具有首发时间早、强度高、影响范围广等特点。

1.2.3.1 现状

(1) 沙尘天气过程

2021年我国共出现13次沙尘天气过程（表1.2），其中扬沙天气过程8次、沙尘暴天气过程3次、强沙尘暴天气过程2次。沙尘天气过程次数较2020年（10次）偏多3次，较近5年平均（12.2次）偏多0.8次。首次过程出现在1月10日。强度最强和影响范围最大的过程为3月13日至18日强沙尘暴天气过程。

2021年沙尘天气过程具有首发时间早、强度高、影响范围广等特点。2021年首次沙尘天气过程起始于1月10日，较近5年平均（2月16日）偏早37天，比2020年（2月13日）偏早34天，为2002年以来最早。2021年发生沙尘暴及以上级别过程为5次，较近5年平均偏多2.2次，其中2021年春季发生4次，为2013年以来同期最多。2021年3月13日至18日强沙尘暴天气过程，北京等地PM₁₀浓度为2013年有观测记录以来最高值，影响面积达到380万平方公里，甚至导致极少出现沙尘天气的上海、湖北、湖南和广西等地的PM₁₀浓度显著升高，本次过程从影响范围和强度上来看均为近十年来最强。

表 1.2 2021 年沙尘天气过程纪要表

编号	起止时间	过程类型	主要影响范围
202101	1月10-16日	扬沙	内蒙古中西部、甘肃中北部、青海北部、宁夏中北部、陕西北部、山西、河北、北京、天津、河南、山东、江苏北部、安徽北部、湖北中部、湖南北部、江西西北部等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古西部、甘肃中部的部分站点出现沙尘暴，内蒙古额济纳旗出现强沙尘暴。
202102	1月27-28日	扬沙	内蒙古西部、甘肃河西、宁夏、陕西中北部、山西、河南、安徽等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古吉兰太出现沙尘暴。

编号	起止时间	过程类型	主要影响范围
202103	2月26-28日	扬沙	新疆东部和南疆盆地，青海北部、甘肃、内蒙古西部和东部、宁夏、辽宁中西部、吉林中西部、黑龙江西部等地的部分地区出现扬沙或者浮尘天气，新疆南疆盆地东部、青海柴达木盆地的部分地区出现沙尘暴。
202104	3月13-18日	强沙尘暴	新疆东部和南疆、甘肃大部、青海东北部及柴达木盆地、内蒙古大部、宁夏、陕西、山西、北京、天津、河北、黑龙江中西部、吉林中西部、辽宁中部、山东、河南、江苏中北部、安徽中北部、湖北西部等地出现大范围扬沙或浮尘天气，其中，内蒙古中西部、甘肃西部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部、北京、天津等地出现沙尘暴，内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部、北京等地的部分地区出现强沙尘暴
202105	3月19-21日	扬沙	新疆南疆、内蒙古中西部、甘肃、青海北部、宁夏、陕西中北部、山西、河北中南部、河南、安徽北部、湖北中部、湖南北部等地出现扬沙或浮尘天气
202106	3月27日-4月1日	强沙尘暴	新疆东部和南疆盆地、青海北部、甘肃大部、宁夏、内蒙古中西部、黑龙江西南部、吉林、辽宁、陕西大部、山西、北京、天津、河北、河南、山东、湖北北部、安徽北部、江苏、上海、浙江北部等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古中部、陕西北部、河北西北部的部分地区出现沙尘暴，内蒙古中部出现强沙尘暴。
202107	4月14-16日	沙尘暴	新疆东部和南疆盆地、青海北部、甘肃北部、宁夏、内蒙古大部、黑龙江西南部、吉林西部、辽宁西北、陕西北部、山西、北京、天津、河北、河南、山东、安徽北部、江苏北部等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古中西部局地出现沙尘暴。
202108	4月25-27日	扬沙	新疆南疆盆地、青海东北部、内蒙古大部、甘肃河西、陕西北部、宁夏、山西北部、河北北部和中部、山东中北部、黑龙江西部局地、吉林西部等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古西部、甘肃中部的部分地区出现沙尘暴。

编号	起止时间	过程类型	主要影响范围
202109	5月1-3日	扬沙	新疆东部和南疆盆地、青海西北部、内蒙古西部、甘肃中部、宁夏北部、陕西北部、山西北部出现扬沙或浮尘天气，新疆南疆盆地的部分地区出现沙尘暴，于田、且末出现强沙尘暴。
202110	5月6-8日	沙尘暴	新疆南疆盆地西部、内蒙古中西部和东南部、宁夏、陕西中北部、山西、河北、北京、天津、山东、河南、安徽北部、江苏、上海、辽宁等地出现扬沙或浮尘天气，内蒙古西部和东南部的部分地区有沙尘暴，乌拉特中旗、达尔罕茂明安联合旗出现强沙尘暴
202111	5月11-12日	扬沙	新疆南疆盆地、青海西北部、内蒙古西部、甘肃河西的部分地区出现扬沙或浮尘天气，新疆南疆盆地的部分地区出现沙尘暴，铁干里克、塔中出现强沙尘暴。
202112	5月22-24日	扬沙	内蒙古中西部、宁夏、山西北部、河北、北京、天津、山东中北部出现扬沙或浮尘天气，内蒙古中部出现沙尘暴。
202113	11月5-6日	沙尘暴	新疆东部和南疆盆地、甘肃中西部、内蒙古西部、宁夏、陕西中北部等地出现扬沙或浮尘天气，新疆南疆盆地部分地区出现沙尘暴，若羌、塔中出现强沙尘暴。

注：在同一次天气过程中，相邻3个或3个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了强沙尘暴或特强沙尘暴天气，记为强沙尘暴天气过程；相邻3个或3个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了沙尘暴或更强沙尘天气，记为沙尘暴天气过程；相邻5个或5个以上国家基本（准）站在同一观测时次出现了扬沙或更强沙尘天气，记为扬沙天气过程*。

* 参照《沙尘天气等级》（GB/T 20480—2006）

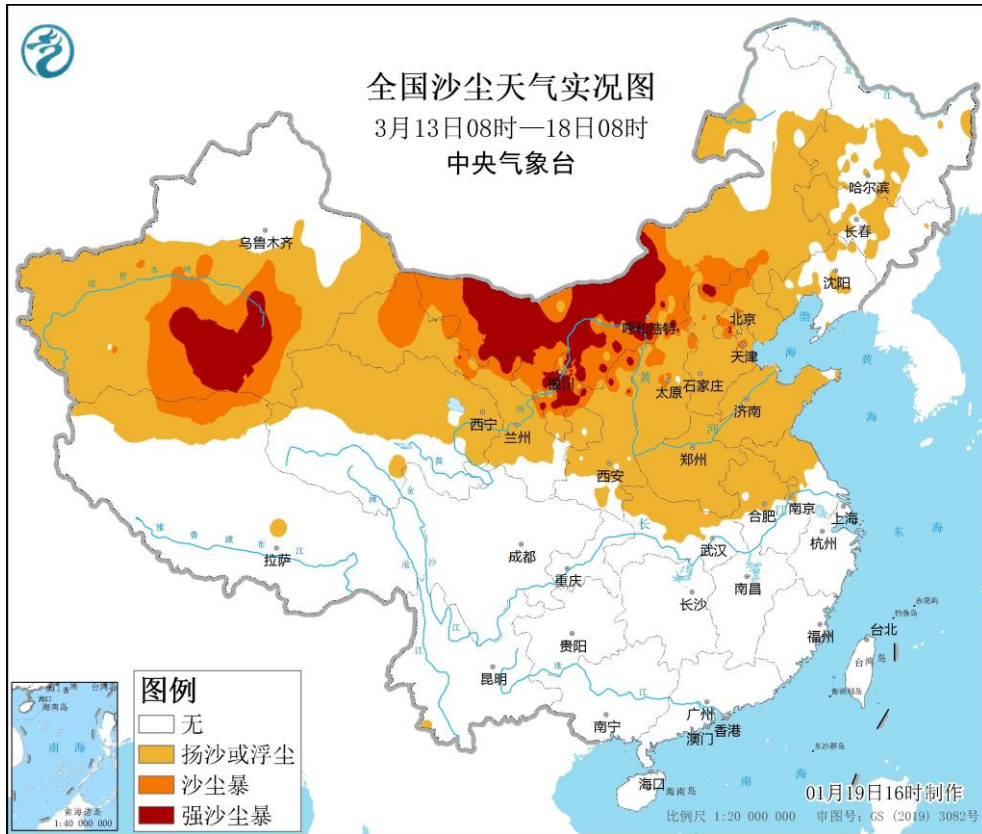


图 1.8 3 月 13 日至 18 日沙尘天气过程影响实况

(2) 沙尘天气日数

2021 年我国长江以北大部分地区都出现了沙尘天气，沙尘天气影响到了湖南、广西等地的部分地区。华北、黄淮、江淮北部、东北地区南部等地沙尘天气日数约为 3-10 天，西北地区东部约为 10-30 天，内蒙古西部和新疆南疆盆地超过 50 天，其中，新疆于田站最多，达到 101 天。沙尘暴主要出现在新疆南疆盆地、青海北部、甘肃北部、内蒙古中西部、山西北部、河北北部、北京等地，其中，内蒙古中西部出现沙尘暴天气的日数约为 3-7 天，新疆南疆盆地局部达 5-8 天。强沙尘暴主要出现在新疆南疆盆地、青海西北部、内蒙古西部和甘肃北部，出现的日数为 1-3 天。

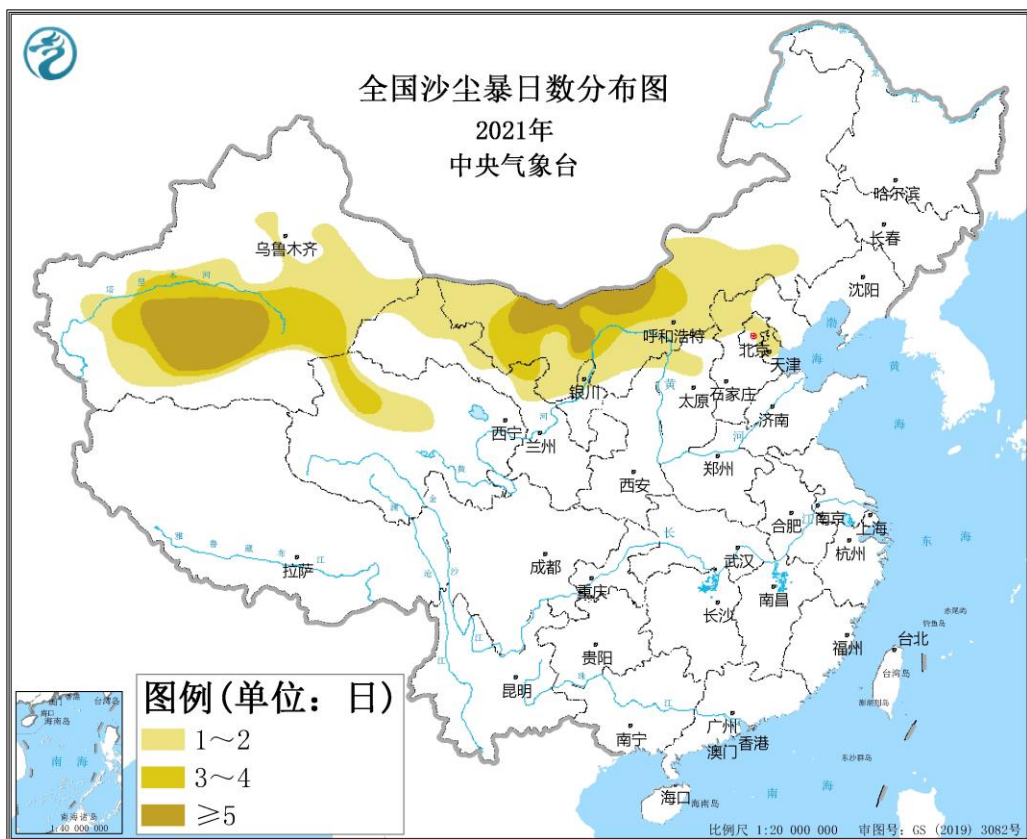
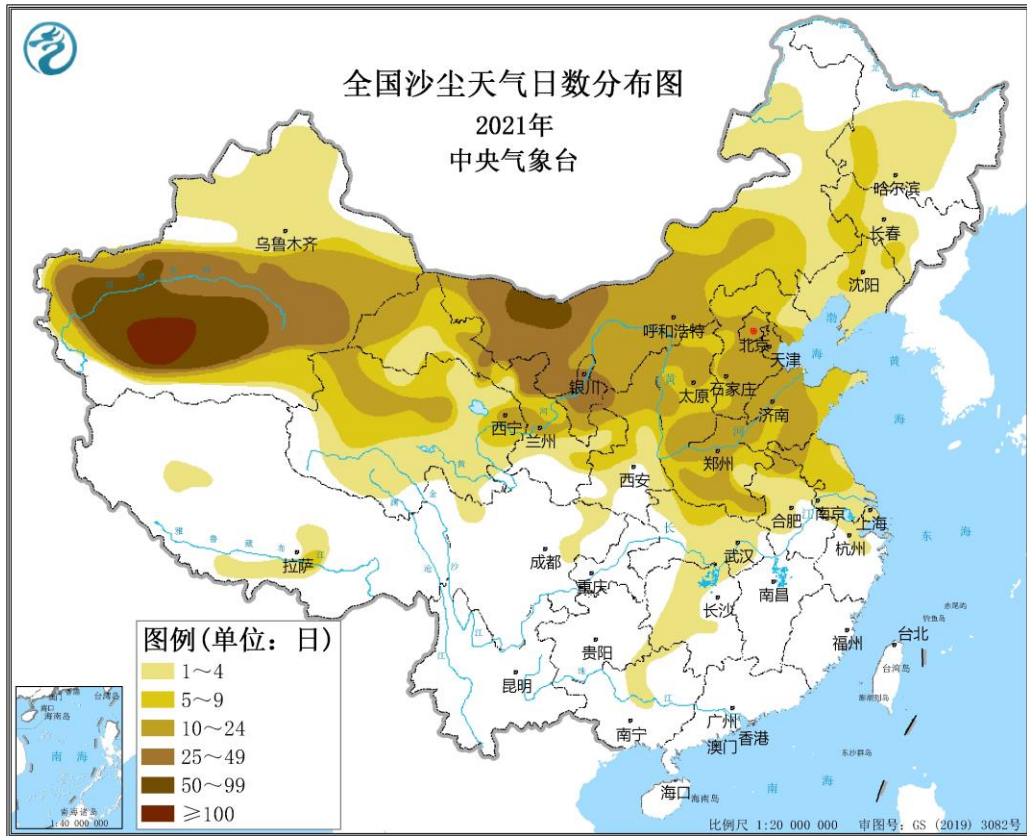


图 1.9 2021 年沙尘天气日数 (上) 和沙尘暴日数 (下)

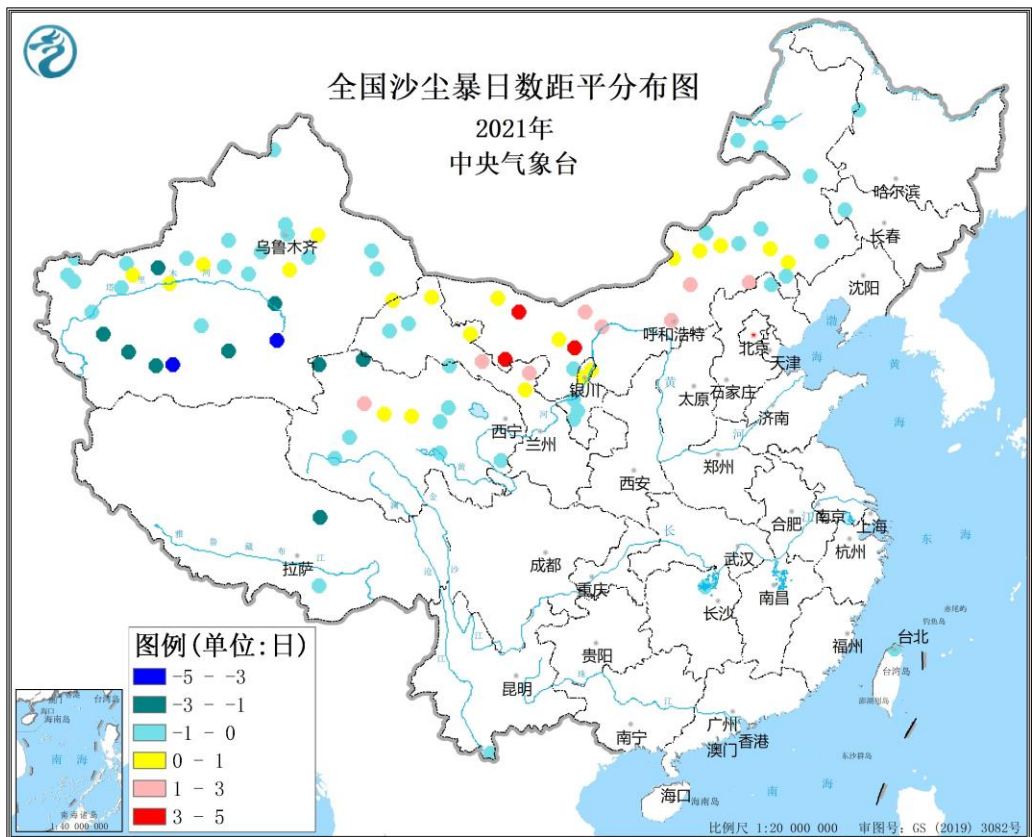
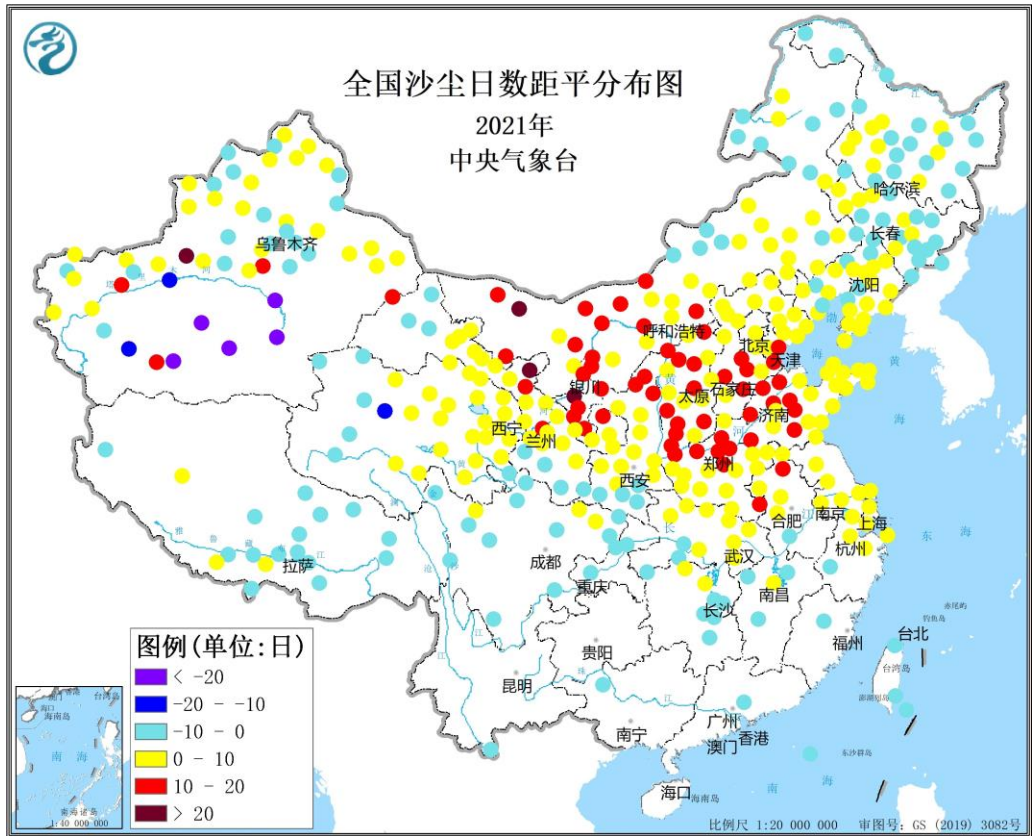


图 1.10 2021 年沙尘天气 (上) 与沙尘暴 (下) 日数与近 5 年平均差值分布

在我国 673 个基准气象观测站中，2021 年共有 341 个站点出现了沙尘天气，较 2020 年 (278 站) 偏多 63 站，较近 5 年平均 (270.2 站) 偏多 70.8 站。2021 年，我国北方大部分地区沙尘天气日数较近 5 年平均偏多，仅新疆、西藏、青海西部、东北地区等地的部分地区略偏少。其中，西北地区东部、华北、黄淮北部等地的部分地区沙尘天气日数较近 5 年平均偏多超过 10 天，新疆南疆盆地东部沙尘天气日数较近 5 年平均偏少超过 20 天。2021 年，内蒙古中西部沙尘暴天气日数较近 5 年平均偏多 1-5 天，西北地区和内蒙古东部等地沙尘暴天气日数较近 5 年平均偏少 1-2 天，新疆南疆盆地东部较近 5 年平均偏少 2-5 天。

1.2.3.2 长期变化

2000 年至 2021 年，沙尘天气过程次数呈现先减少后增加的趋势。2000 年至 2010 年平均每年出现沙尘天气过程 15.7 次；2011 年至 2014 年，每年发生 7-10 次沙尘天气过程，平均每年出现 8.8 次；2015 年至 2021 年，每年出现沙尘天气过程的次数增加至平均 12.7 次。

2000 年至 2020 年，沙尘暴天气过程次数呈现显著减少的趋势。其中，2000 年至 2010 年平均每年出现沙尘暴天气过程 6.5 次，2011 年至 2020 年平均每年仅 1.9 次。但是，2021 年出现 3 次沙尘暴天气过程，较近 10 年平均偏多。

2000 年至 2020 年，每年出现 1-2 次强沙尘暴天气过程，仅 2001 年、2002 年和 2006 年出现 5 次。2021 年出现强沙尘暴天气过程 2 次，较 2011 年至 2020 年平均 (1.1 次) 偏多 0.9 次。

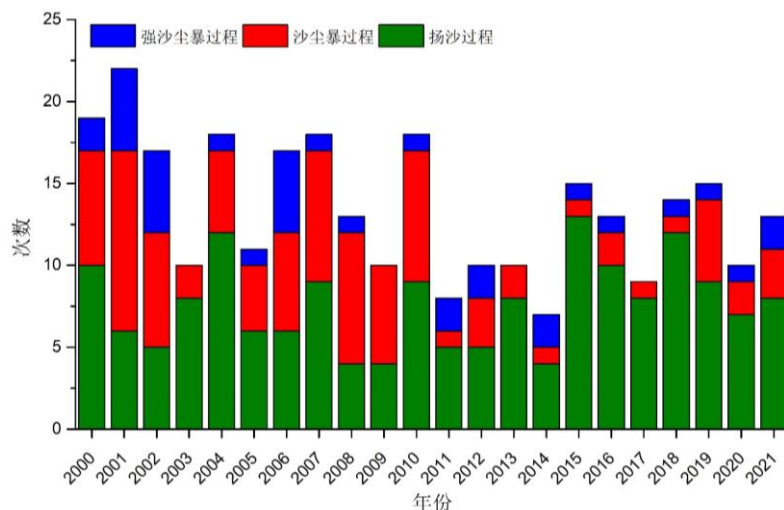


图 1.11 2000 年至 2021 年沙尘天气过程次数

1.3 大气颗粒物浓度

1.3.1 PM₁₀ 浓度

2021 年全国 PM₁₀ 平均浓度为 54 微克/立方米 (数据来源: 中国环境监测总站), 全国大部区域均较 2020 年下降, 较 2016 年大幅下降。

1.3.1.1 现状

全国: 2021 年平均浓度为 54 微克/立方米, 较 2020 年下降 3.6%, 较 2016 年下降 23.9%。

京津冀: 2021 年平均浓度为 69 微克/立方米, 较 2020 年下降 10.4%, 较 2016 年下降 38.9%。

汾渭平原: 2021 年平均浓度为 76 微克/立方米, 较 2020 年下降 8.4%, 较 2016 年下降 29.6%。

长三角: 2021 年平均浓度为 56 微克/立方米, 与 2020 年持平, 较 2016 年下降 22.2%。

珠三角: 2021 年平均浓度为 41 微克/立方米, 较 2020 年升高 7.9%, 较 2016 年下降 8.9%。

其他区域: 2021 年, 我国北方区域均较 2020 年下降明显, 但是华中等南方区域较 2020 年略有上升。

1.3.1.2 大气本底站长期变化

中国气象局 5 个国家大气本底站 (湖北金沙、云南香格里拉、新疆阿克达拉、浙江临安、黑龙江龙凤山) 观测资料显示, 2021 年阿克达拉、香格里拉、金沙、临安和龙凤山站 PM₁₀ 浓度分别为 20.2、7.2、35.4、45.6、27.7 微克/立方米, 较 2020 年分别下降 15.4%、增加 30.8%、增加 1.7%、下降 3.0%、增加 70.7%。

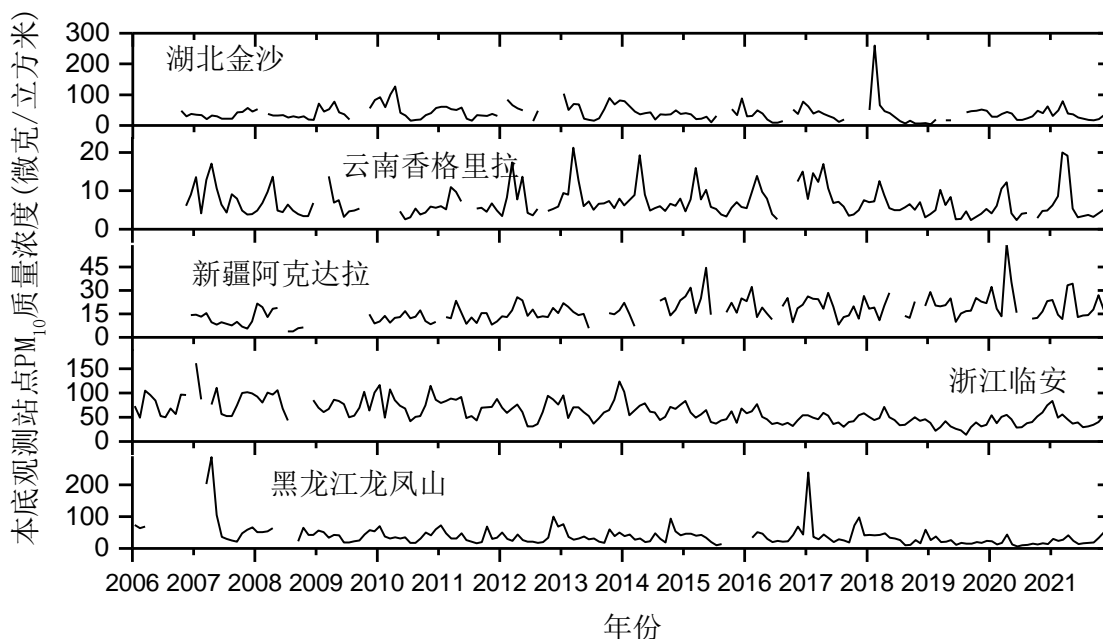


图 1.12 2006 年至 2021 年 5 个本底站 PM₁₀ 质量浓度月均值时间序列

(注:金沙站、香格里拉站、阿克达拉站、临安站、龙凤山站为 WMO-GAW 区域大气本底站, 分别从 2006 年、2007 年、2007 年、2005 年、2005 年开始观测)

2006 至 2021 年观测资料显示, 香格里拉站多年平均 PM₁₀ 浓度最低 (7.0 微克/立方米), 临安站最高 (61.5 微克/立方米), 阿克达拉、龙凤山、金沙站则分别为 16.9、40.9、40.9 微克/立方米。从年际变化来看, 临安、龙凤山、金沙站的 PM₁₀ 浓度呈下降趋势 (平均年变率分别为-3.2、-2.6、-0.5 微克/立方米/年), 阿克达拉呈弱上升趋势 (平均年变率 0.7 微克/立方米/年), 香格里拉站的变化趋势不明显。

1.3.2 PM_{2.5} 浓度

2021 年全国 PM_{2.5} 平均浓度为 30 微克/立方米 (数据来源: 中国环境监测总站), 全国大部分区域较 2020 年下降明显, 较 2016 年呈现大幅下降。

1.3.2.1 现状

全国: 2021 年平均浓度为 30 微克/立方米, 较 2020 年下降 9.1%, 较 2016 年下降 28.6%。

京津冀: 2021 年平均浓度为 38 微克/立方米, 较 2020 年下降 13.6%, 较 2016 年下降 44.1%。

汾渭平原: 2021 年平均浓度为 42 微克/立方米, 较 2020 年下降 12.5%, 较 2016 年下降 32.3%。

长三角：2021 年平均浓度为 31 微克/立方米，较 2020 年下降 11.4%，较 2016 年下降 34.0%。

珠三角：2021 年平均浓度为 21 微克/立方米，与 2020 年持平，较 2016 年下降 30.0%。

其他区域：2021 年，我国北方区域均较 2020 年下降明显，但是西南等区域较 2020 年略有上升。

1.3.2.2 大气本底站长期变化

中国气象局 4 个国家大气本底站*（北京上甸子、湖北金沙、云南香格里拉、新疆阿克达拉）观测资料显示，2021 年金沙、香格里拉、阿克达拉、上甸子站 PM_{2.5} 浓度分别为 27.1、5.5、10.2、25.2 微克/立方米，较 2020 年分别上升 16.9%、上升 31.6%、下降 21.9%、上升 17.7%。

2006 至 2021 年观测资料显示，香格里拉、阿克达拉、金沙三和上甸子站的多年平均 PM_{2.5} 浓度均为 5.1、10.2、30.7 和 38.0 微克/立方米。从年际变化来看，北京上甸子、湖北金沙 2 站年平均 PM_{2.5} 浓度呈现出下降趋势（平均年变率分别为-1.9、-0.7 微克/立方米/年）；阿克达拉站呈弱上升趋势（平均年变率约 0.3 微克/立方米/年），香格里拉站的变化趋势不明显。

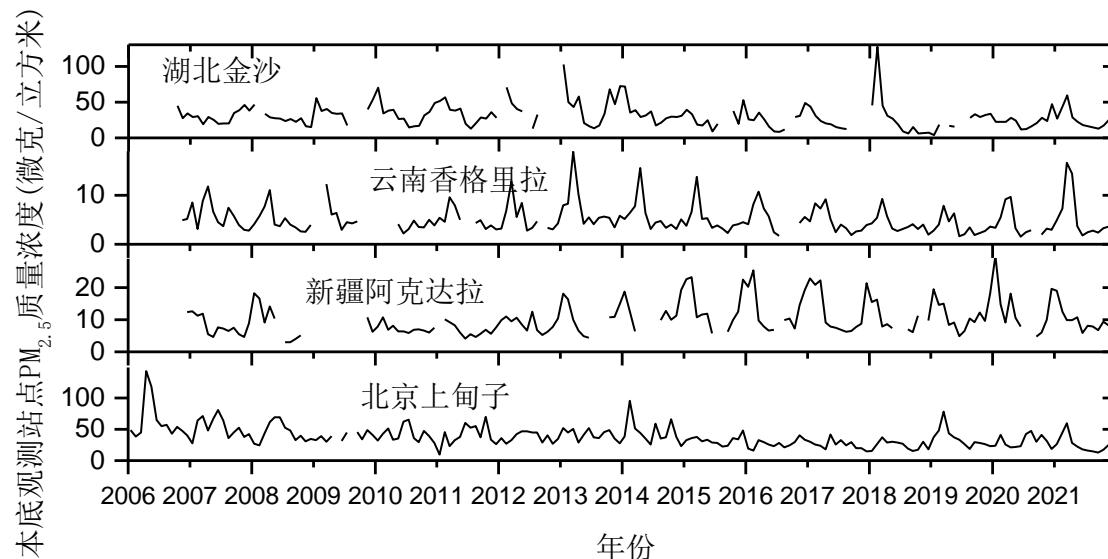


图 1.13 2006 年至 2021 年 4 个本底站 PM_{2.5} 质量浓度月均值时间序列

(注：上甸子站、金沙站、香格里拉站、阿克达拉站为 WMO-GAW 区域大气本底站，分别从 2005 年、2006 年、2007 年、2007 年开始观测)

* 上甸子站 2019 年 3 月起设备型号从 TEOM1400a 变更为 TEOM1405DF；金沙站 2019 年 8 月起设备型号从 GRIMM180 变更为 TEOM1405DF；香格里拉站设备型号为 GRIMM180；阿克达拉站 2021 年 3 月起设备型号从 GRIMM180 变更为 TEOM1405DF。

1.4 反应性气体

1.4.1 地面臭氧浓度

2021 年全国臭氧浓度*为 137 微克/立方米 (数据来源: 中国环境监测总站), 全国北方部分区域较 2020 年下降, 南方部分区域较 2020 年升高, 均较 2016 年上升明显。

1.4.1.1 现状

全国: 2021 年平均浓度为 137 微克/立方米, 较 2020 年下降 0.7%, 较 2016 年上升 8.7%。

京津冀: 2021 年平均浓度为 161 微克/立方米, 较 2020 年下降 8.5%, 较 2016 年上升 2.5%。

汾渭平原: 2021 年平均浓度为 165 微克/立方米, 较 2020 年上升 2.5%, 较 2016 年上升 17.9%。

长三角: 2021 年平均浓度为 151 微克/立方米, 较 2020 年下降 0.7%, 较 2016 年上升 8.6%。

珠三角: 2021 年平均浓度为 153 微克/立方米, 较 2020 年上升 3.4%, 较 2016 年上升 10.9%。

其他区域: 2021 年, 东北地区较 2020 年下降明显, 西北等地较 2020 年略有上升。

1.4.1.2 大气本底站长期变化

中国气象局 6 个大气本底站 (北京上甸子、黑龙江龙凤山、浙江临安、云南香格里拉、青海瓦里关、新疆阿克达拉) 中, 上甸子、瓦里关、香格里拉站 2021 年地面臭氧浓度较 2020 年均有所下降, 而临安、龙凤山和阿克达拉站略有上升。多年的地面臭氧浓度**资料显示, 瓦里关站多年平均浓度 (111.9 微克/立方米) 显著高于其它站 (67.7-83.7 微克/立方米); 最高浓度一般出现在 4-6 月 (阿克达拉站 2 月最高), 最低浓度一般出现在冬季 (香格里拉站一般夏秋季最低)。上甸子和瓦里关站浓度呈现弱上升趋势 (平均年变率分别为 0.1 微克/立方米/年和

*统计标准参照《环境空气质量评价技术规范 (试行)》(HJ 663-2013)

**统计标准参照《大气成分资料统计处理业务规定 (试行)》(气预函 (2017) 44 号)

0.4 微克/立方米/年); 临安站呈现弱下降趋势 (平均年变率约为-0.1 微克/立方米/年); 龙凤山和香格里拉站下降趋势较明显 (平均年变率分别为-0.6 微克/立方米/年和-0.5 微克/立方米/年)。

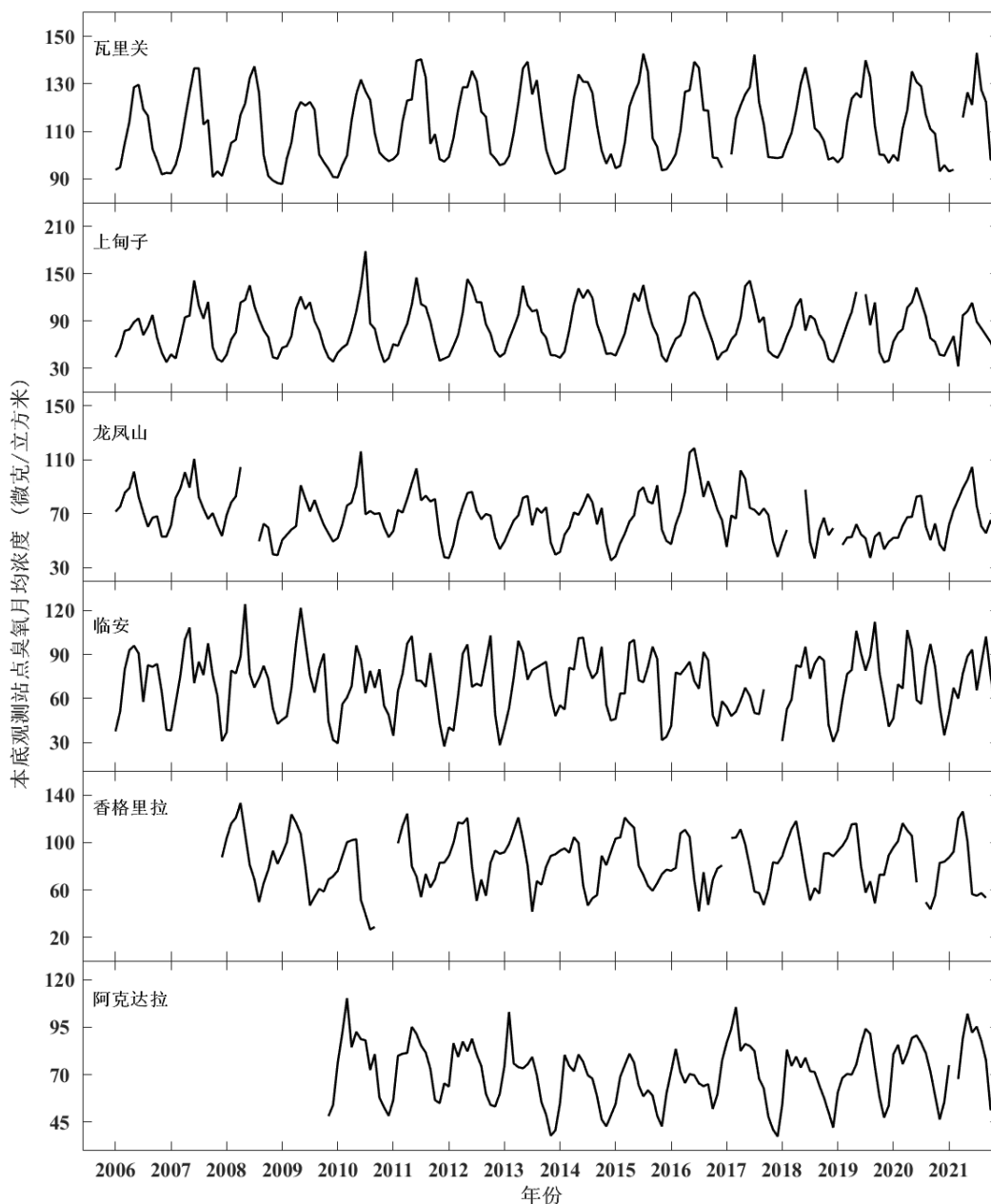


图 1.14 2006 年至 2021 年 6 个大气本底站地面臭氧月平均浓度时间序列

(注: 瓦里关站为 WMO-GAW 全球大气本底站, 上甸子站、龙凤山站、临安站、香格里拉站、阿克达拉站为 WMO-GAW 区域大气本底站, 分别从 2004 年、2005 年、2005 年、2007 年、2009 年开始观测)

1.4.2 对流层臭氧总量

基于卫星监测对流层臭氧总量结果显示，2021 年我国对流层臭氧总量*较 2020 年、2016 年有所增加。

卫星监测产品分析显示：2021 年全国对流层臭氧总量高值主要分布在我国中东部地区。2021 年，京津冀地区较 2020 年和 2016 年分别升高 8.1%和 5.3%；汾渭平原较 2020 年和 2016 年分别升高 8.8%和 8.0%；长三角较 2020 年和 2016 年分别升高 9.8%和 10.4%；珠三角较 2020 年和 2016 年分别升高 0.5%和 0.6%。

从 2006 年至 2021 年全国及重点区域对流层臭氧总量的逐月变化图可以看出，对流层臭氧具有夏季高、冬季低的季节周期变化特征。夏季京津冀、长三角和汾渭平原的对流层臭氧总量一般高于珠三角地区。

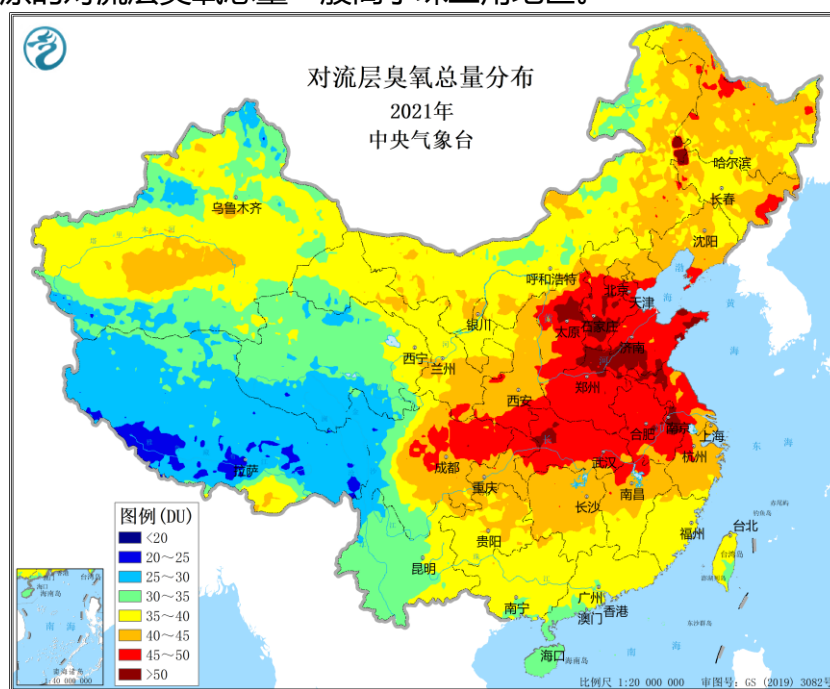


图 1.15 2021 年全国对流层臭氧总量 (单位: DU*) 分布

* 对流层臭氧总量是指大气底部到对流层层顶的垂直臭氧总量。对流层臭氧总量统计值为区域内所有地点在卫星过境时刻晴空条件下的对流层气柱总量，与城市站点的近地面观测臭氧浓度存在差异。

* DU 为多布森单位(Dobson Unit), 1 标准大气压下, 温度 273K 下, 0.01mm 厚度的臭氧层为一个多布森单位。

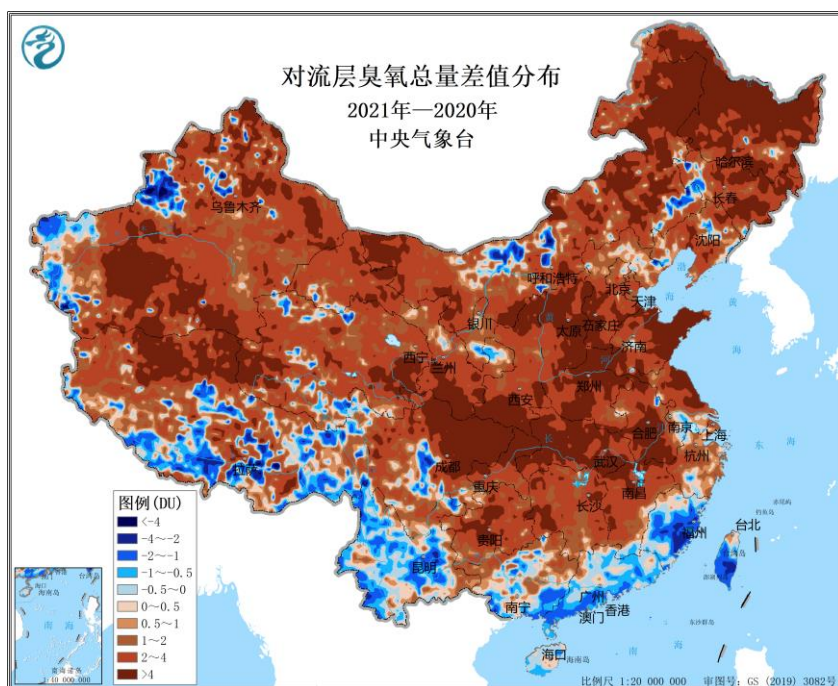


图 1.16 2021 年与 2020 年全国对流层臭氧总量 (单位:DU) 差值分布

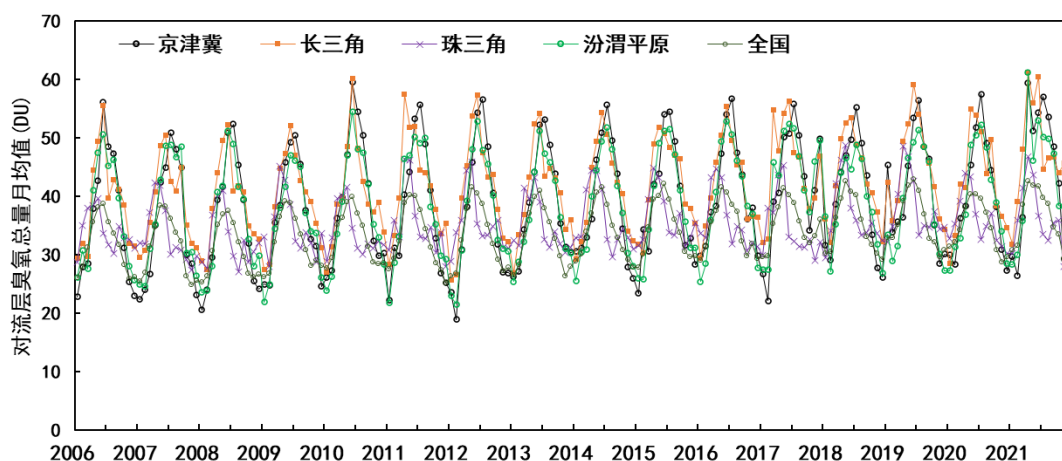


图 1.17 2006 年至 2021 年全国及重点区域对流层臭氧总量逐月平均值时间序列

1.4.3 NO₂ 对流层总量和 SO₂ 柱总量

卫星监测显示, NO₂ 对流层总量*高值主要分布在京津冀及周边、汾渭平原、长三角、珠三角等区域。2021 年全国平均 NO₂ 对流层总量较 2020 年升高 4.89%, 较 2016 年下降 4.87%。京津冀较 2020 年和 2016 年分别下降 5.5% 和 22.2%; 汾渭平原较 2020 年和 2016 年分别下降 0.5% 和 15.7%; 长三角较 2020 年升高 4.9%, 较 2016 年下降 5.9%; 珠三角较 2020 年升高 6.0%, 较 2016 年下降 12.0%。

* NO₂ 对流层总量是指大气底部到对流层层顶的垂直 NO₂ 总量。NO₂ 对流层总量统计值为区域内所有地点在卫星过境时刻晴空条件下的对流层气柱总量, 与城市站点的近地面观测 NO₂ 浓度存在差异。

2021年SO₂柱总量*高值区主要分布在京津冀及周边、长三角、汾渭平原和东北地区。2021年全国平均SO₂柱总量较2020年和2016年都偏高。京津冀和珠三角较2020年有所下降，而汾渭平原和长三角较2020年有所上升。

自2006年以来，全国及重点区域NO₂对流层总量呈现先上升、后下降的趋势。从月均值上看，京津冀地区NO₂对流层总量在2013年1月达到峰值。从年均值上看，全国NO₂对流层总量在2011年达到峰值，2006-2011年，全国NO₂对流层总量以8.2%/年的速度上升；2011-2020年，全国NO₂对流层总量以-4.2%/年的变率平缓下降，而2021年全国NO₂柱浓度相比2020年则有所上升。SO₂柱总量则呈先上升、后下降、再上升、再下降趋势，总体呈下降趋势。全国SO₂柱总量在2007年达到峰值，2011年达到次峰值。

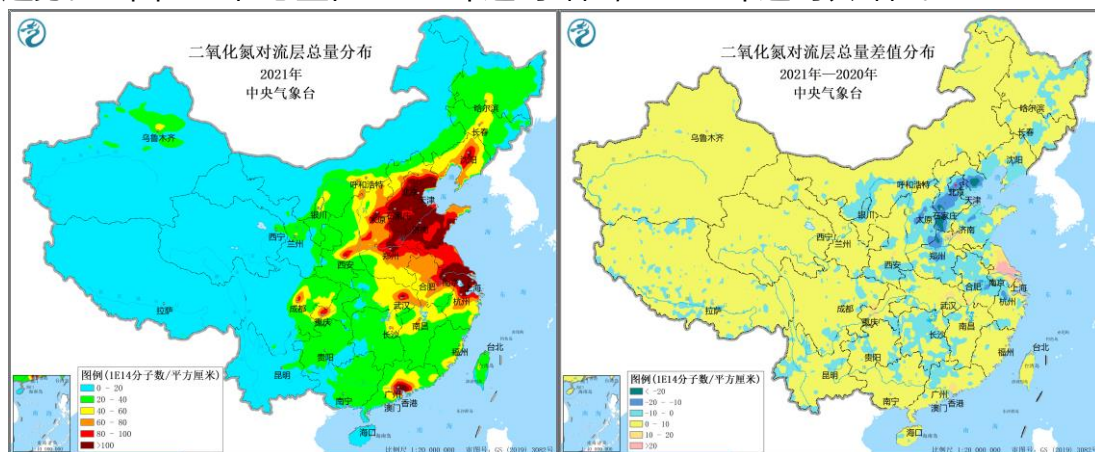


图 1.18 2021 年 NO₂ 对流层总量及其与 2020 年差值分布

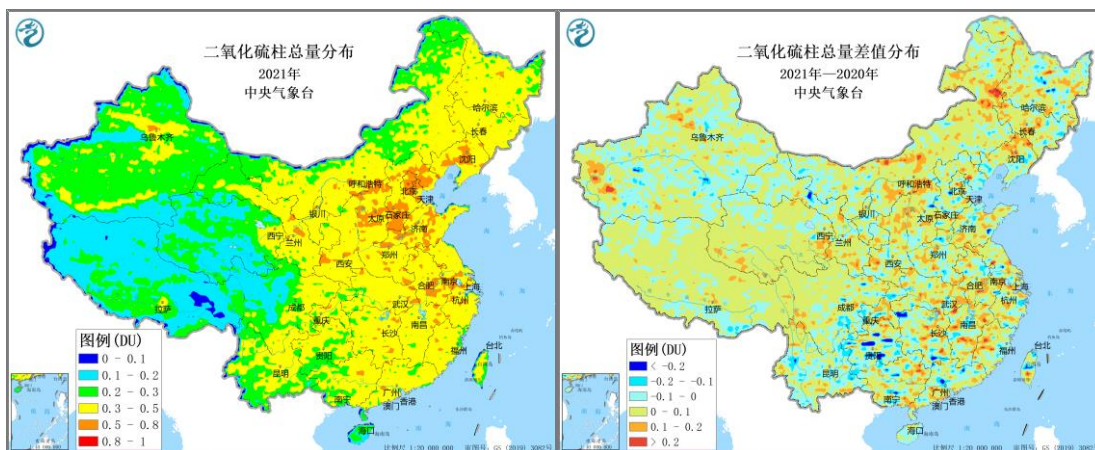


图 1.19 2021 年 SO₂ 柱总量及其与 2020 年差值分布

* SO₂ 柱总量是指大气底部到大气层层顶的垂直 SO₂ 总量。SO₂ 柱总量统计值为区域内所有地点在卫星过境时刻晴空条件下的整层气柱总量，与城市站点的近地面观测 SO₂ 浓度存在差异。

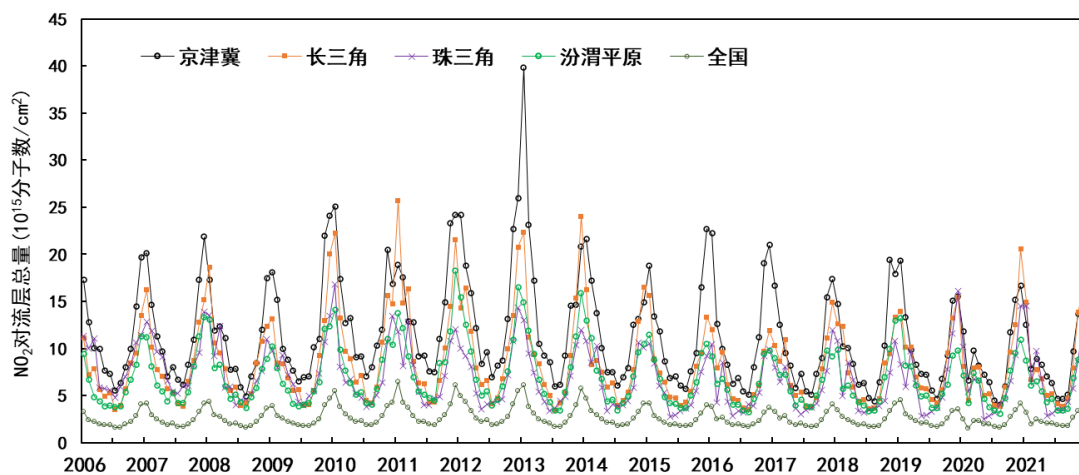


图 1.20 2006 年至 2021 年全国及重点区域 NO₂ 对流层总量的逐月变化

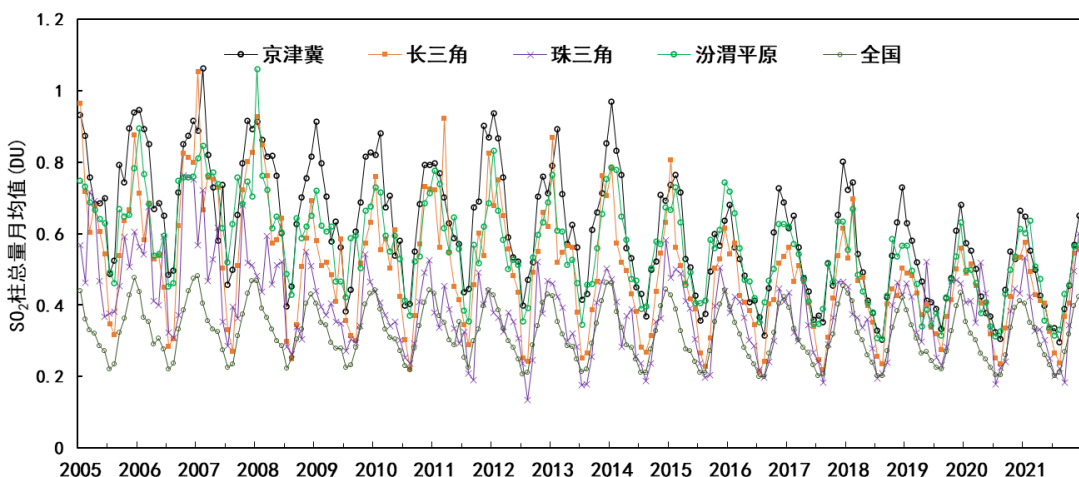


图 1.21 2006 年至 2021 年全国及重点区域 SO₂ 柱总量的逐月变化

1.5 酸雨

1.5.1 现状

中国气象局酸雨观测站网观测结果显示：2021 年，全国平均降水 pH 值为 6.03，平均酸雨频率为 22.0%，保持了近年来酸雨改善的较好水平。

2021 年，全国酸雨区（降水 pH 值低于 5.60）主要位于江淮、江南、华南大部及西南的局部地区（图 1.22 左），其中江西北部、湖南东部和南部等地平均降水 pH 值低于 5.00，酸雨污染较明显；酸雨频发区（酸雨频率高于 50%）主要位于江南中部、华南中部等南方地区（图 1.22 右），其中江西北部、湖南东北部等地区酸雨频率高于 80%，为酸雨高发区。

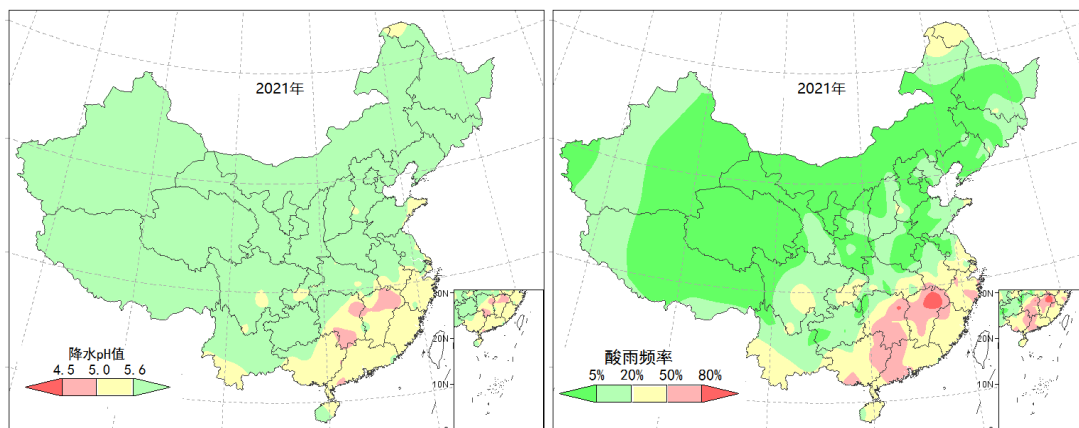


图 1.22 2021 年全国降水 pH 值 (左) 及酸雨频率 (右)

1.5.2 长期变化

中国气象局 74 个酸雨观测站的 30 年观测资料显示, 自 1992 年以来, 全国酸雨污染经历了改善、恶化、再次改善的阶段性变化。1992 年至 1999 年为酸雨改善期, 平均降水 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率的年变率分别为 0.03/年、-0.7%/年、-0.7%/年; 2000 年至 2007 年酸雨污染恶化, 平均降水 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率的年变率分别为-0.06/年、2.1%/年、1.6%/年; 2008 年以来酸雨污染状况再度改善, 平均降水 pH 值、酸雨频率、强酸雨频率的年变率分别为 0.05/年、-1.8%/年、-1.3%/年 (图 1.23)。

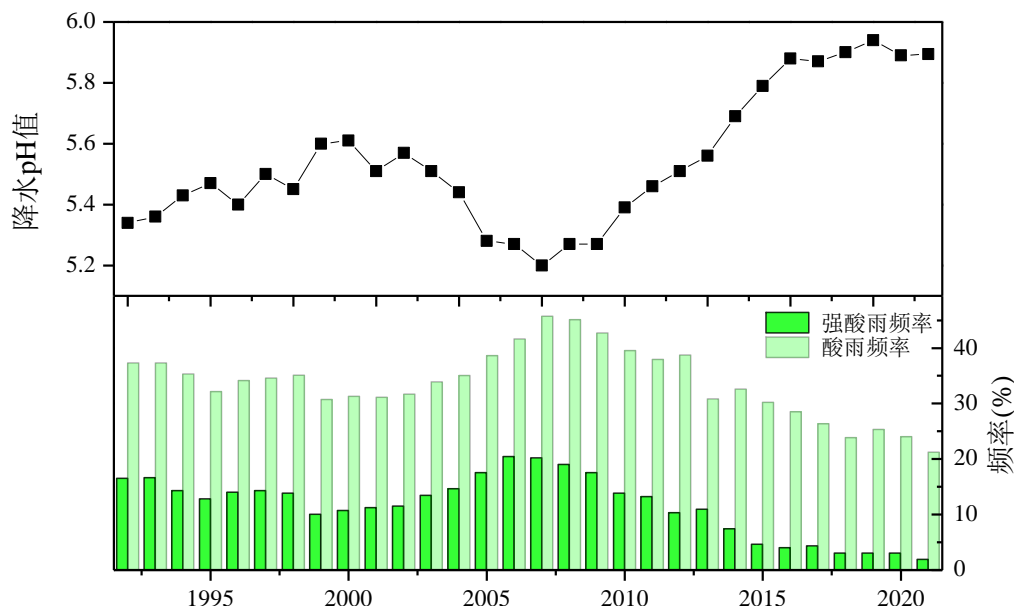


图 1.23 1992 年至 2021 年全国平均降水 pH 值、酸雨频率和强酸雨频率时间序列

附表 1.1 2021 年全国和重点区域大气环境分析表

区域	霾日数				PM ₁₀			PM _{2.5}			O ₃		
	日数 (天)	与 2020 年相比 (天)	与 2016 年相比 (天)	与近 5 年平均 相比	平均浓 度(微克 /立方 米)	与 2020 年相比 (%)	与 2016 年相比 (%)	平均浓 度(微克 /立方 米)	与 2020 年相比 (%)	与 2016 年相比 (%)	平均浓 度(微克 /立方 米)	与 2020 年相比 (%)	与 2016 年相比 (%)
全国	21.3	-2.9	-16.6	-6.9	54	-3.6	-23.9	30	-9.1	-28.6	137	-0.7	8.7
京津冀	31.7	-6.8	-28.7	-19.1	69	-10.4	-38.9	38	-13.6	-44.1	161	-8.5	2.5
京津冀及周边	41.6	-13.4	-65.8	-28.4	78	-10.3	-37.1	43	-15.7	-41.1	171	-5.0	11.0
长三角	20.9	-5.6	-49.9	-23.2	56	0.0	-22.2	31	-11.4	-34.0	151	-0.7	8.6
汾渭平原	35.2	-8.8	-49.2	-25.7	76	-8.4	-29.6	42	-12.5	-32.3	165	2.5	17.9
珠三角	2.1	0.1	-7.3	-3.4	41	7.9	-8.9	21	0.0	-30.0	153	3.4	10.9
东北	16.1	-2.1	-29.1	-7.3	50	-7.4	-24.2	30	-9.1	-25.0	120	-4.8	0.8
华中	23	-1.9	-41.9	-17.9	54	1.9	-26.0	33	-2.9	-29.8	131	-2.2	3.1
西南	13.1	4.6	-23.9	-5.6	41	0.0	-19.6	27	3.8	-15.6	124	-0.8	11.7
西北	15	-3.2	-41.7	-12.9	66	-2.9	-18.5	30	-14.3	-26.8	132	2.3	7.3

注：正值表示增加；负值表示减少；PM₁₀、PM_{2.5}及地面臭氧浓度数据来源于中国环境监测总站

主要区域划分：京津冀（北京、天津、河北）、京津冀及周边（2+26 城市）、汾渭平原（山西、陕西、河南三省共 11 地市）、长三角（上海、江苏、浙江、安徽）、珠三角（广东 9 市）、东北（黑龙江、吉林、辽宁）、华中（湖北、湖南、江西）、西南（云南、贵州、四川、重庆）、西北（陕西、甘肃、宁夏、新疆）

第二部分 全国大气污染气象条件

2.1 概述

大气污染气象条件包括冷空气活动、风速、相对湿度、大气稳定度、降水、气温、辐射等气象要素，是影响大气环境的重要气象因素。

2021年，全国平均气象条件可使PM_{2.5}浓度与2020年基本持平，较近5年平均下降3.3%。京津冀、汾渭平原等北方区域受冷空气偏强、风速偏大、混合层高度偏高等影响，2021年平均气象条件可使PM_{2.5}浓度较2020年下降2-6%；珠三角等南方地区受有效降水日数减少、风速偏小等影响，2021年平均气象条件可使PM_{2.5}浓度较2020年升高3-10%。

2021年，京津冀等北方部分区域受5-9月降水日数偏多、高温和辐射偏弱等影响，气象条件较2020年有利于臭氧浓度下降；珠三角等南方区域受5-9月降水日数偏少、辐射和高温偏强等影响，气象条件较2020年不利于臭氧浓度下降。

2021年，影响我国的主要沙源地受冷空气偏强、大风日数偏多、积雪覆盖偏少等影响，气象条件较2020年有利于沙尘天气的偏多偏强。

2.2 PM_{2.5}污染气象条件

2021年，全国平均PM_{2.5}污染气象条件可使PM_{2.5}浓度与2020年基本持平，较近5年同期平均下降。

2.2.1 冷空气

2021年影响我国的大范围冷空气过程*共计29次，较2020年（27次）偏

* 参照冷空气过程监测指标（QX/T 393—2017）

多 2 次，但较近 5 年平均（30.2 次）偏少 1.2 次。其中强冷空气及以上级别过程 21 次，较 2020 年（13 次）和近 5 年平均（14.4 次）明显偏多。2021 年冬季一共有 14 次冷空气过程，以强冷空气及以上级别过程为主，较 2020 年（13 次）偏多，较近 5 年平均（14.8 次）略偏少。2021 年影响全国的冷空气活动总体偏强。

2021 年影响京津冀地区的冷空气过程为 31 次，较 2020 年（27 次）和近 5 年平均（28.6 次）分别偏多 4 次和 2.4 次。其中强冷空气及以上级别过程 21 次，较 2020（13 次）和近 5 年平均（13.4 次）分别偏多 8 次和 7.6 次。其中，2021 年冬季一共有 14 次冷空气过程，以强冷空气及以上级别过程为主，较 2020 年（13 次）偏多 1 次，较近 5 年平均（14.8 次）偏少 0.8 次。2021 年，影响京津冀地区的冷空气活动总体偏强。

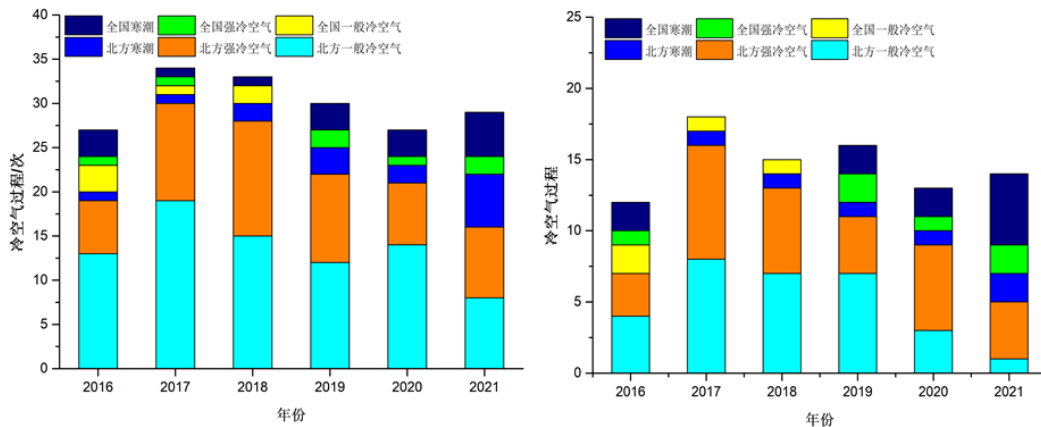


图 2.1 全国 2016 年至 2021 年全年（左）和冬季（右）冷空气过程次数

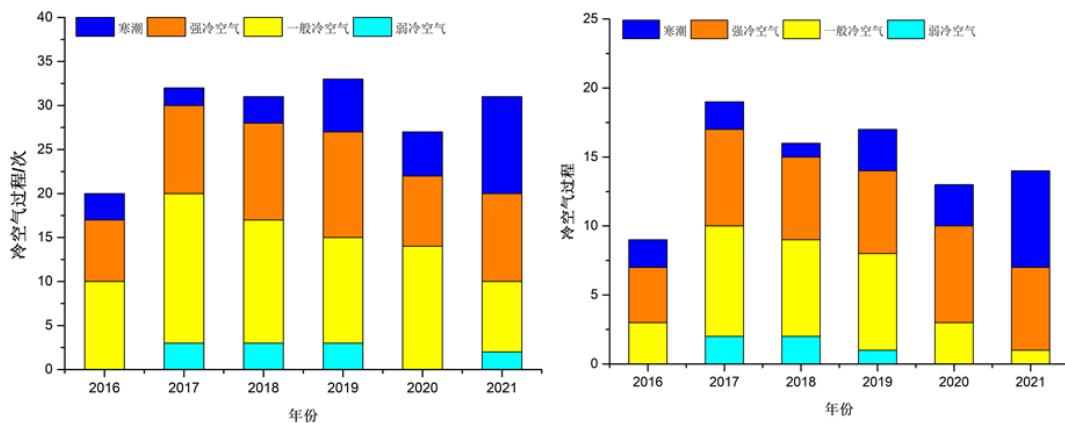


图 2.2 京津冀地区 2016 年至 2021 年全年（左）和冬季（右）冷空气过程次数

2.2.2 风速和小风日数

地面风速决定大气水平扩散能力，风速越大，扩散能力越强。2021 年我国

长江以北大部分地区平均风速较 2020 年和近 5 年平均偏大，小风日数（日平均风速小于 1.5 米/秒的天数，下同）较 2020 年和近 5 年平均偏少，尤其是冬季风速偏大明显，小风日数偏少明显，有利于大气污染物扩散；我国南方部分地区平均风速较 2020 年偏小，小风日数较 2020 年偏多，不利于大气污染物扩散。

全国：2021 年平均风速 2.25 米/秒，较 2020 年偏大 2.3%，较近 5 年平均偏大 1.5%。2021 年冬季，平均风速为 2.13 米/秒，较 2020 年和近 5 年同期分别偏大 4.9%和 1.4%。

京津冀：2021 年平均风速 2.02 米/秒，较 2020 年和近 5 年平均分别偏大 4.7%和 2.0%。2021 年冬季为 2.04 米/秒，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏大 19.3%和 9.2%。

汾渭平原：2021 年平均风速 2.07 米/秒，较 2020 年和近 5 年平均分别偏大 6.7%和 5.5%。2021 年冬季为 2.09 米/秒，较 2020 年和近 5 年同期分别偏大 13.0%和 10.3%。

长三角：2021 年平均风速 2.2 米/秒，较 2020 年和近 5 年分别偏大 4.8%和 2.4%。2021 年冬季为 2.16 米/秒，与 2020 年和近 5 年同期持平。

珠三角：2021 年平均风速 2.07 米/秒，较 2020 年偏小 3.3%，与近 5 年平均持平。2021 年冬季为 2.05 米/秒，较 2020 年和近 5 年同期分别偏小 6.4%和 6.0%。

其他区域：2021 年平均风速与 2020 年相比，东北、华中、西南偏小，西北偏大；与近 5 年平均相比，东北偏小，华中、西南、西北偏大。

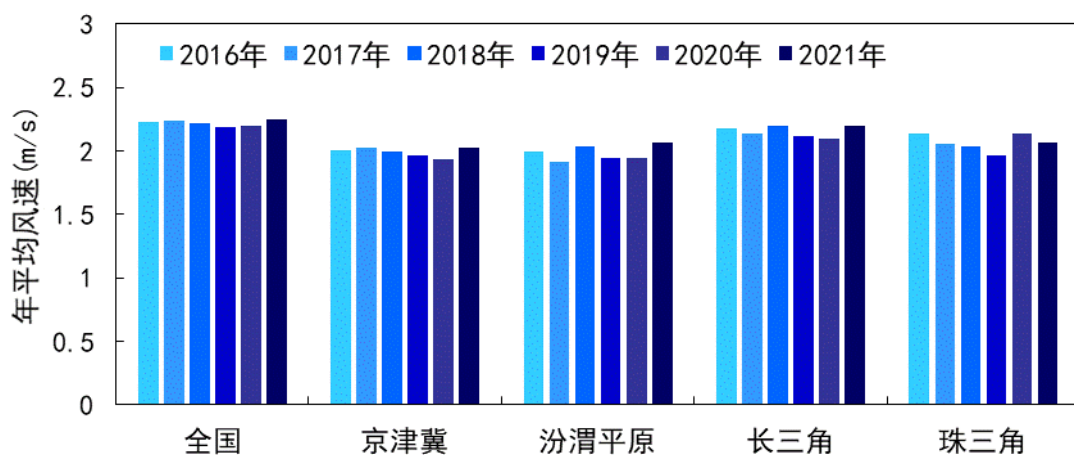


图 2.3 2016 年至 2021 年全国及重点区域年平均风速变化

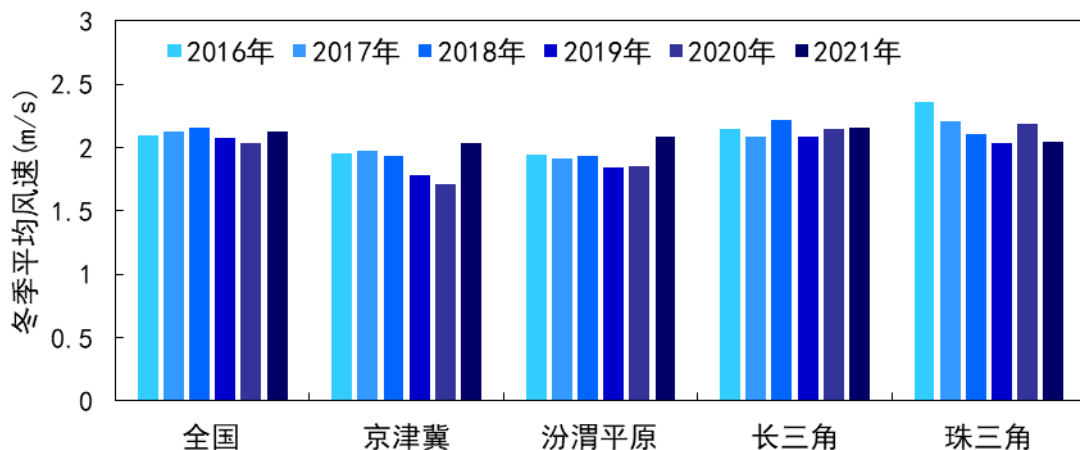


图 2.4 2016 年至 2021 年全国及重点区域冬季平均风速变化

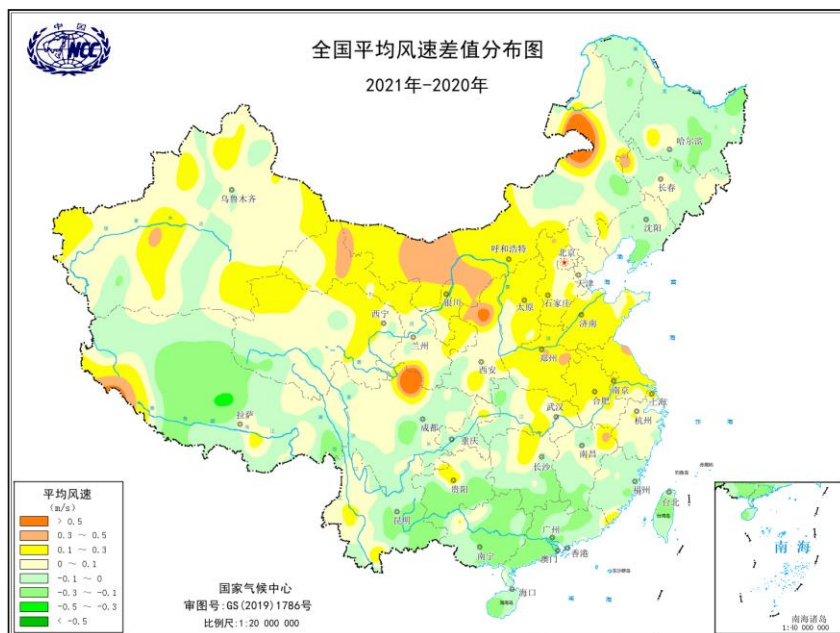


图 2.5 2021 年与 2020 年平均风速差值分布

全国：2021 年平均小风日数 109.6 天，较 2020 年和近 5 年平均分别偏少 2.4%和 2.7%。2021 年冬季，全国平均小风日数为 44.1 天，较 2020 年和近 5 年同期分别偏少 6.8%和 2.9%。

京津冀：2021 年平均小风日数 125.8 天，较 2020 年偏少 6.4%，与近 5 年平均持平。2021 年冬季为 43.8 天，较 2020 年和近 5 年同期分别偏少 25.9%和 12.1%。

汾渭平原：2021 年平均小风日数 111.3 天，较 2020 年和近 5 年平均分别偏少 14.3%和 7.9%。2021 年冬季为 38.8 天，较 2020 年和近 5 年同期分别偏少 26.1%和 17.1%。

长三角：2021 年平均小风日数 103.4 天，较 2020 年和近 5 年平均分别偏少 9.1%和 4.8%。2021 年冬季为 38.9 天，较 2020 年和近 5 年同期分别偏少

5.3%和4.9%。

珠三角：2021年平均小风日数102.5天，较2020年偏多4.6%，较近5年平均偏少3.9%。2021年冬季为37.3天，较2020年和近5年同期平均分别偏多7.7%和4.4%。

其他区域：2021年小风日数与2020年相比，东北、华中、西南偏多，西北偏少；与近5年平均相比，东北偏多，华中、西南、西北偏少。

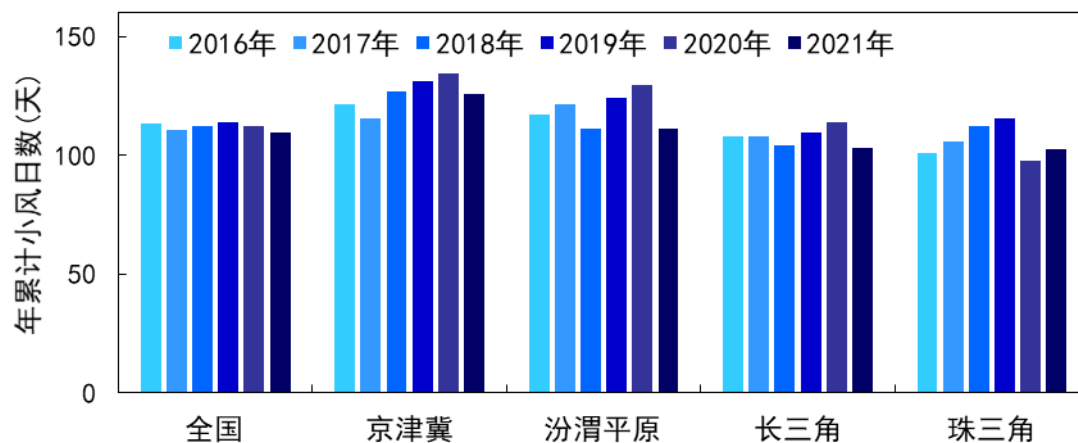


图 2.6 2016年至2021年全国及重点区域小风日数变化

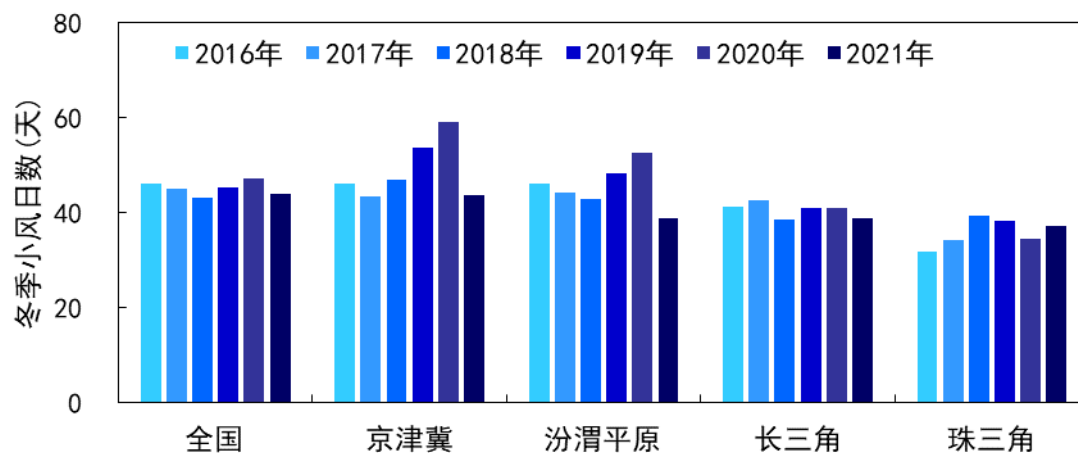


图 2.7 2016年至2021年全国及重点区域冬季小风日数变化

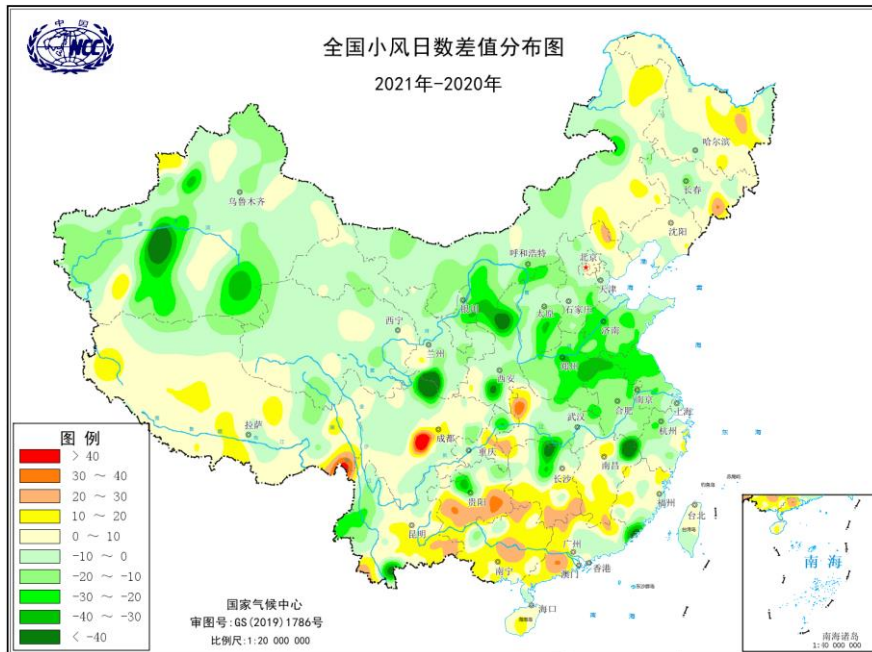


图 2.8 2021 年与 2020 年小风日数差值分布

2.2.3 相对湿度

地面相对湿度影响细颗粒物浓度，在静稳天气下，相对湿度越高，越有利于细颗粒物浓度升高。2021 年我国北方大部地区相对湿度较 2020 年和近 5 年平均偏高，南方大部地区较 2020 年和近 5 年平均偏低。但是，冬季全国大部地区相对湿度较 2020 年和近 5 年平均偏低，有利于颗粒物浓度降低。

全国：2021 年全国平均相对湿度为 60.5%，与 2020 年和近 5 年平均持平。2021 年冬季为 57.4%，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏低 7.3%和 3.9%。

京津冀：2021 年平均相对湿度为 62.3%，较 2020 年和近 5 年平均分别偏高 2.4%和 6.3%。2021 年冬季为 54.1%，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏低 11.4%和 1.6%

汾渭平原：2021 年平均相对湿度为 62.3%，较 2020 年偏低 2.7%，较近 5 年平均偏高 1.4%。2021 年冬季为 50.5%，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏低 21.3%和 12.8%。

长三角：2021 年平均相对湿度为 75.8%，较 2020 年和近 5 年平均分别偏低 1.6%和 1.5%。2021 年冬季为 69.5%，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏低 9.6%和 9.0%。

珠三角：2021 年平均相对湿度为 75.3%，较 2020 年和近 5 年分别偏低 4.3%和 5.9%。2021 年冬季为 67.0%，较 2020 年和近 5 年同期平均分别偏低 8.0%

和 10.7%。

其他区域：2021 年相对于 2020 年和近 5 年平均，东北、西南均偏高，华中、西北均偏低。

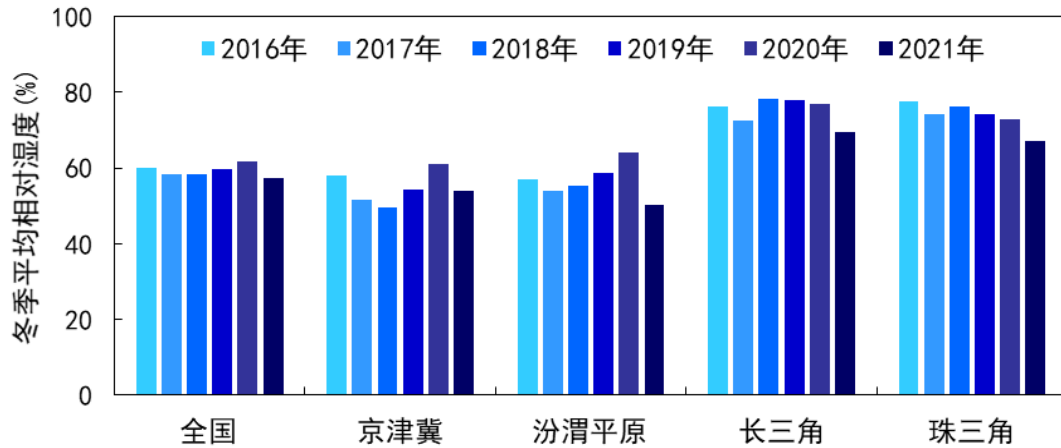
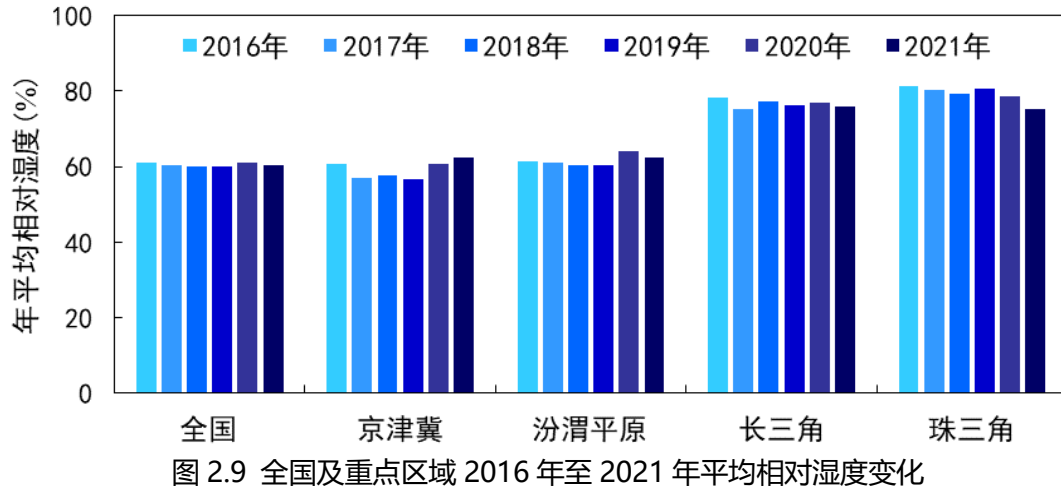


图 2.10 全国及重点区域 2016 年至 2021 年冬季平均相对湿度变化

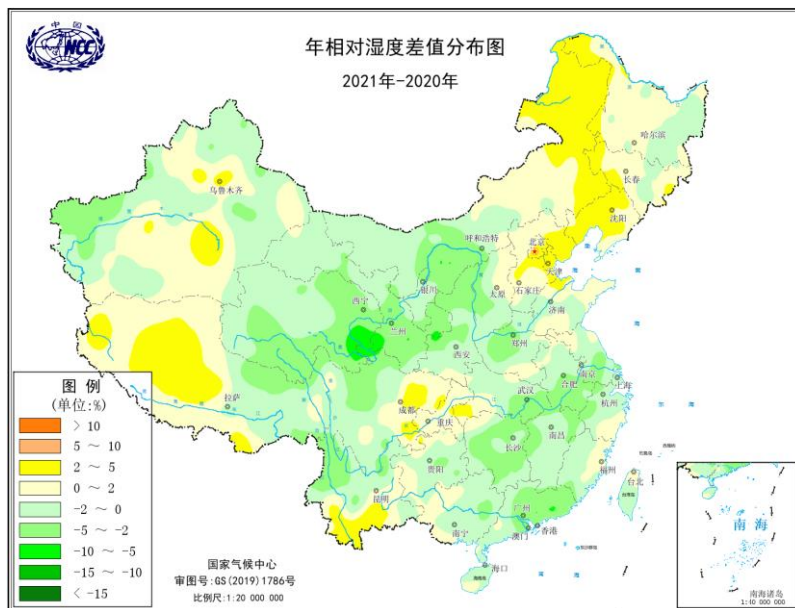


图 2.11 2021 年与 2020 年平均相对湿度差值分布

2.2.4 有效降水日数

有效降水(日降水量大于等于5mm)可以对大气污染物有较好的清除作用。2021年北方大部地区有效降水日数较2020年和近5年平均偏多,有利于大气污染物的清除,南方大部分地区有效降水日数较2020年和近5年平均偏少,不利于大气污染物的清除。

全国:2021年平均有效降水日数33.4天,较2020年和近5年平均分别偏少0.2天和0.4天。2021年冬季为3.1天,较2020年和近5年同期平均分别偏少0.4天和0.6天。

京津冀:2021年平均有效降水日数34.5天,较2020年和近5年平均分别偏多8.9天和11.3天。2021年冬季为2.4天,与2020年同期持平,较近5年同期平均偏多1.1天。

汾渭平原:2021年平均有效降水日数39.7天,较2020年和近5年平均分别偏多7.1天和10.4天。2021年冬季为3.0天,较2020年同期偏少1.6天,较近5年同期偏多0.5天。

长三角:2021年平均有效降水日数61.1天,较2020年偏少3.1天,与近5年平均持平。2021年冬季为8.4天,较2020年同期和近5年同期平均分别偏少7.3天和8.0天。

珠三角:2021年平均有效降水日数57.7天,较2020年和近5年平均分别偏少8.0天和16.0天。2021年冬季为5.1天,较2020年和近5年同期平均分别偏少1.2天和3.8天。

其他区域:与2020年和近5年平均相比,2021年东北、西北有效降水日数均偏多,华中和西南均偏少。

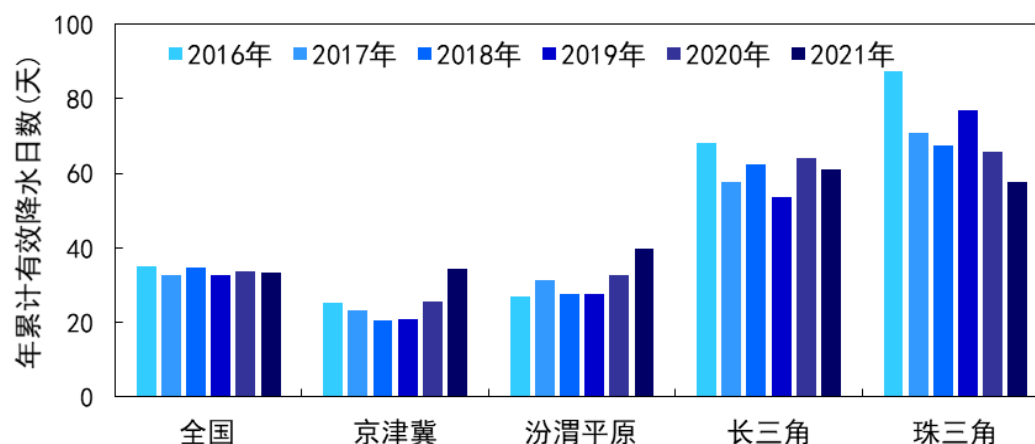


图 2.12 2016 年至 2021 年全国及重点区域年累计有效降水日数变化

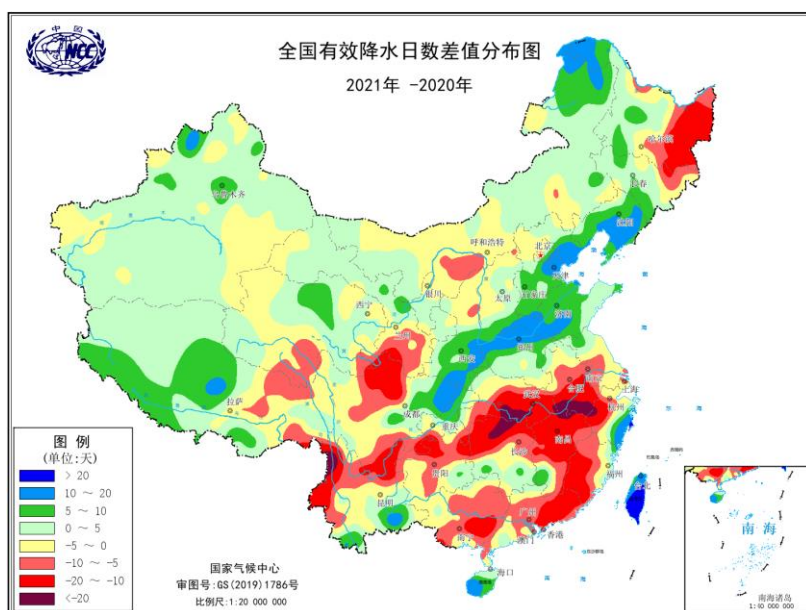


图 2.13 2021 年与 2020 年有效降水日数差值分布

2.2.5 混合层高度

混合层高度*是大气污染物可以在垂直方向混合的最大高度，混合层高度越高，越有利于污染物在垂直方向的扩散。2021 年全国平均混合层高度较 2020 年和近 5 年平均偏高。

全国：2021 年平均混合层高度为 899 米，较 2020 年偏高 2.3%，较近 5 年平均偏高 3.0%。2021 年冬季为 913 米，较 2020 年同期偏高 12.2%，较近 5 年同期偏高 8.9%。

京津冀：2021 年平均混合层高度为 887 米，较 2020 年偏高 1.3%，较近 5 年平均偏低 0.6%。2021 年冬季为 958 米，较 2020 年同期偏高 23.0%，较近 5 年同期偏高 10.0%。

汾渭平原：2021 年平均混合层高度为 938 米，较 2020 年偏高 6.3%，较近 5 年平均偏高 4.2%。2021 年冬季为 1053 米，较 2020 年同期偏高 29.3%，较近 5 年同期偏高 19.2%。

长三角：2021 年平均混合层高度为 872 米，较 2020 年偏高 4.6%，较近 5 年平均偏高 5.4%。2021 年冬季为 923 米，较 2020 年同期偏高 13.7%，较近 5 年同期偏高 14.1%。

珠三角：2021 年平均混合层高度为 1045 米，较 2020 年偏高 2.3%，较近

* 基于地面常规气象观测资料，考虑热力湍流和机械湍流对混合层的共同作用，采用罗氏法计算。

5年平均偏高6.3%。2021年冬季为1119米，较2020年同期偏高5.0%，较近5年同期偏高7.9%。

其他区域：除西南地区外，全国大部区域均较2020年和近5年平均偏高。

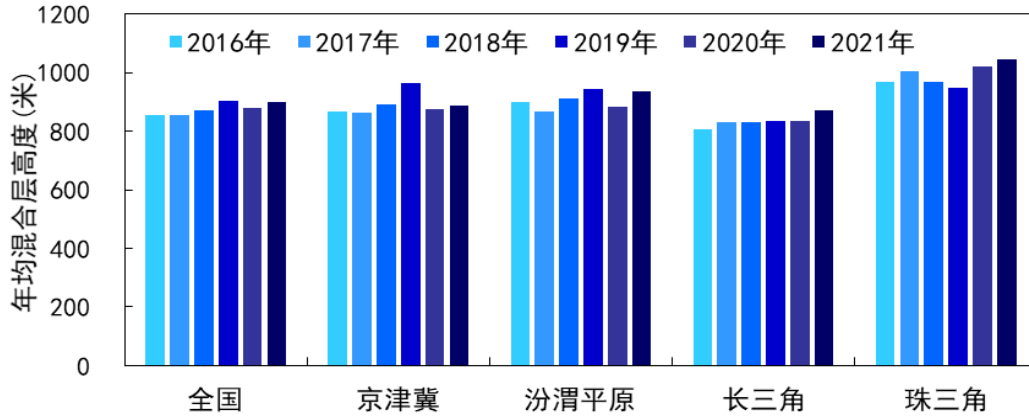


图 2.14 2016 年至 2021 年全国及重点区域全年平均混合层高度变化

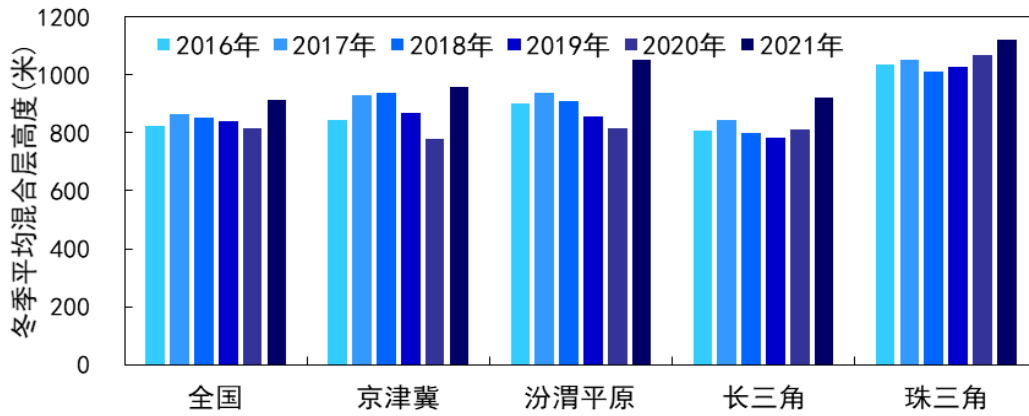


图 2.15 2016 年至 2021 年全国及重点区域冬季平均混合层高度变化

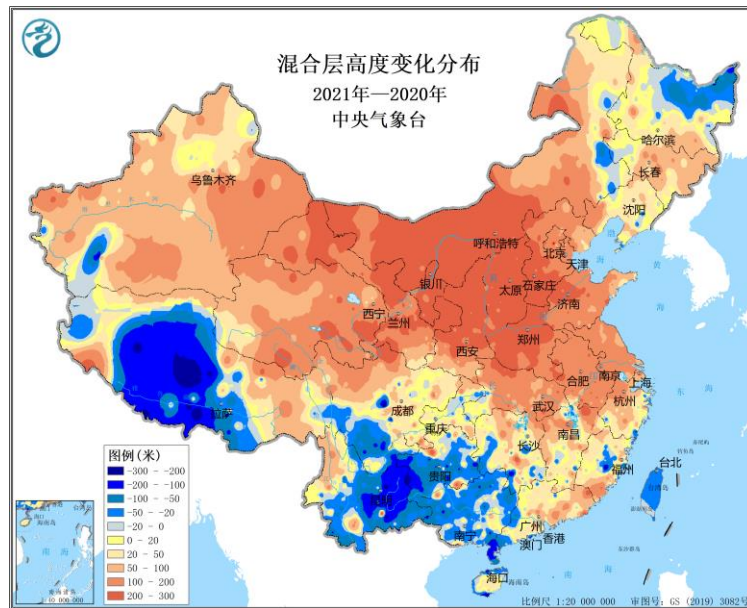


图 2.16 2021 年与 2020 年混合层高度差值分布

2.2.6 冬季静稳天气指数

静稳天气指数综合考虑大气水平扩散（风速）、垂直扩散（混合层高度、垂直稳定度）、相对湿度等气象要素，表征大气水平和垂直方向扩散的能力。静稳天气指数越高，大气自净能力越弱。静稳天气主要出现在冬季，因此分析冬季静稳天气指数的变化。2021年冬季全国以及京津冀、长三角和汾渭平原等地区的大气扩散条件较2020年同期和近5年同期平均偏好，有利于大气污染物扩散。

全国：2021年冬季平均为10.0，较2020年和近5年同期平均分别偏低8.3%和4.8%。

京津冀：2021年冬季平均为8.9，较2020年和近5年同期平均分别偏低10.1%和2.2%。

汾渭平原：2021年冬季平均为8.5，较2020年和近5年同期平均分别偏低18.3%和10.5%。

长三角：2021年冬季平均为10.4，较2020年和近5年同期平均分别偏低8.0%和7.1%。

珠三角：2021年冬季平均为10.3，较2020年和近5年同期平均分别偏低4.6%和7.2%。

其他区域：2021年，全国其他大部地区较2020年同期偏低。

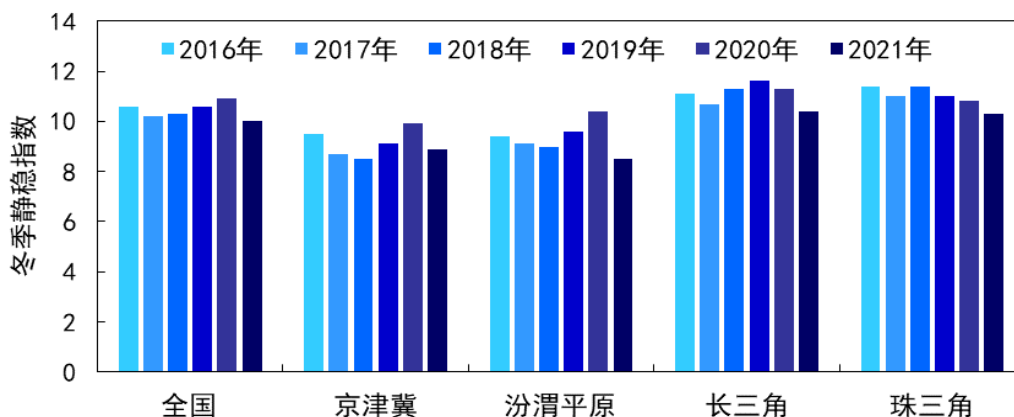


图 2.17 2016 年至 2021 年全国及重点区域冬季平均静稳天气指数变化

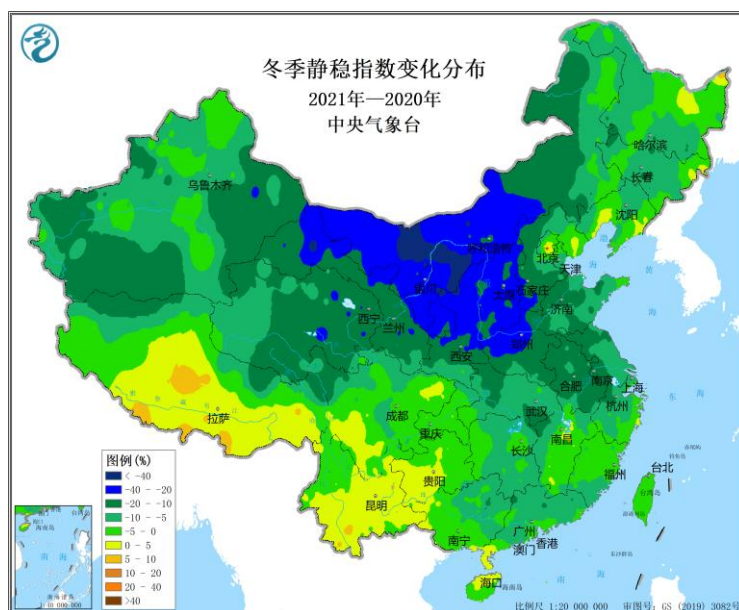


图 2.18 2021 年与 2020 年冬季平均静稳天气指数变率分布

2.2.7 PM_{2.5} 污染气象条件综合评估

PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI) * 是利用气象观测资料, 采用数值解法计算出表征气象条件变化对 PM_{2.5} 浓度影响的气象指数。EMI 指数值越小代表气象条件越有利于 PM_{2.5} 浓度降低。2021 年全国平均 PM_{2.5} 污染气象条件与 2020 年基本持平, 其中北方大部地区气象条件有利于 PM_{2.5} 浓度下降, 南方部分地区气象条件有利于 PM_{2.5} 浓度升高。

全国: 2021 年平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年升高 0.4%、较近 5 年平均下降 3.3%。其中冬季平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年同期平均分别下降 2.0%和 5.7%。

京津冀: 2021 年平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年平均分别下降 6.4%和 5.5%。其中冬季平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年同期平均分别下降 13.4%和 5.6%。

汾渭平原: 2021 年平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年平均分别下降 1.9%和 7.2%。其中冬季平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年同期平均分别下降 12.1%和 13.2%。

长三角: 2021 年平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年平均分别下

* EMI 是指在排放不变的条件下, 由于传输、扩散和沉降的气象条件变化所导致 PM_{2.5} 浓度变化的指数, EMI 可用来表征气象条件的定量贡献。EMI 计算方法参照《PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI)》(QX/T 479—2019); 统计方法参照《气象条件对大气污染防治效果影响评估服务规范 (暂行)》(气减函 (2019) 68 号)

降 0.1%和 7.0%。其中冬季平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年同期升高 0.1%、较近 5 年同期平均下降 3.6%。

珠三角：2021 年平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年平均分别升高 10.4%和 2.5%。其中冬季平均气象条件可使 PM_{2.5} 较 2020 年和近 5 年同期平均分别升高 14.9%和 8.3%。

其他区域：2021 年，东北、华中、西南等地区平均气象条件均使 PM_{2.5} 浓度较 2020 年升高。

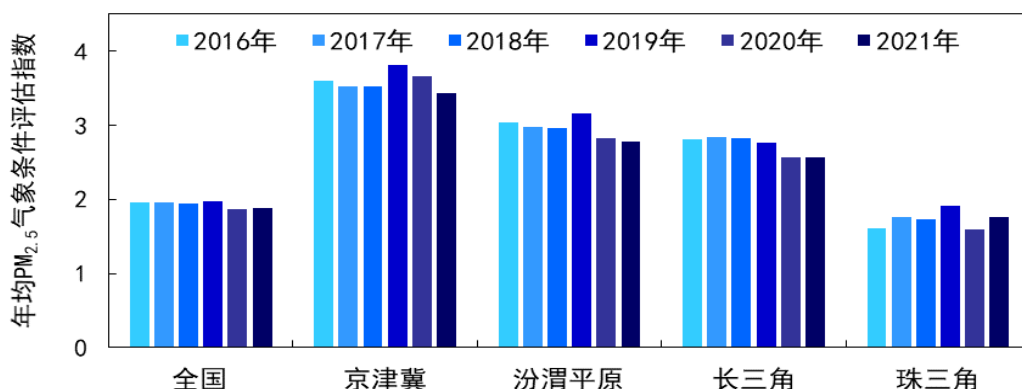


图 2.19 2016 年至 2021 年全国及重点区域 PM_{2.5} 气象条件评估指数变化

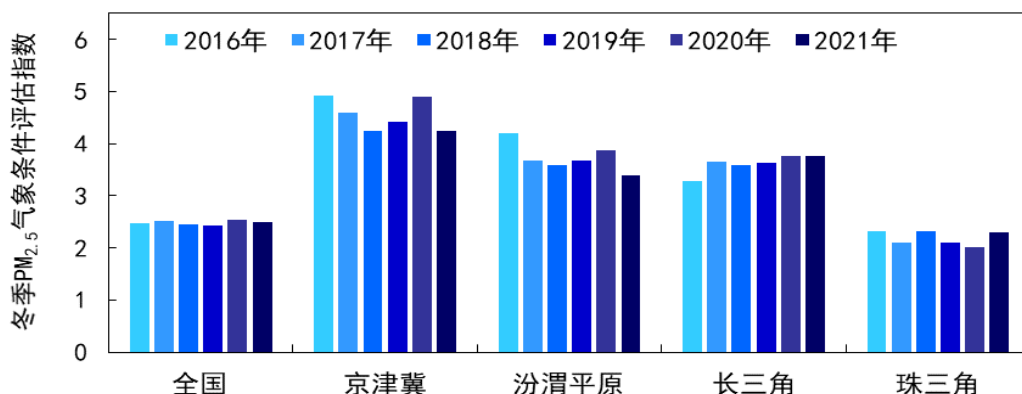


图 2.20 2016 年至 2021 年全国及重点区域冬季 PM_{2.5} 气象条件评估指数变化

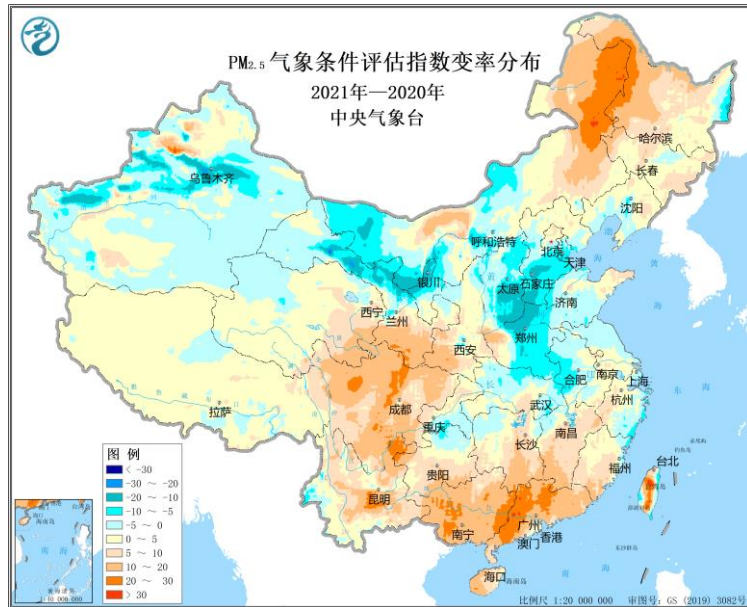


图 2.21 2021 年相对于 2020 年全国年平均 PM_{2.5} 气象条评估指数变率(%)分布

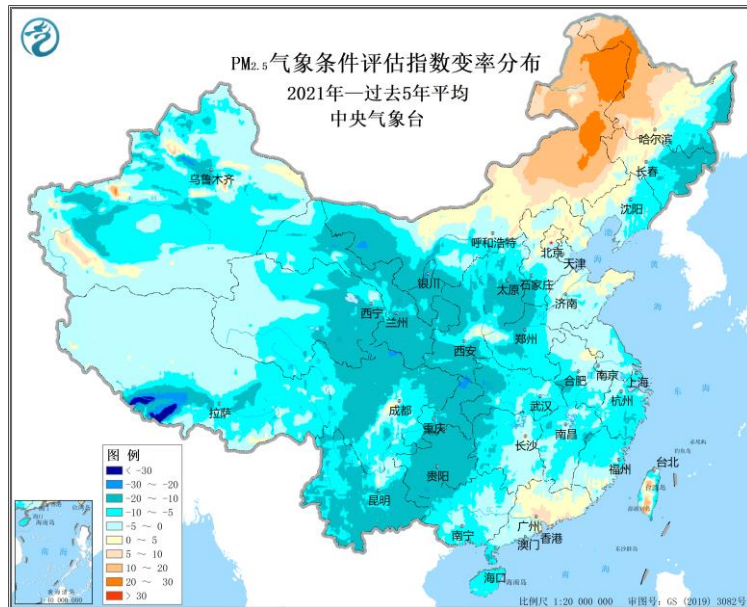


图 2.22 2021 年相对于近 5 年平均全国年平均 PM_{2.5} 气象条评估指数变率(%)分布

附表 2.1 2021 年全国和重点区域 PM_{2.5} 污染气象条件分析表

区域	冬季静稳天气指数			风速			小风日数			相对湿度			有效降水日数			PM _{2.5} 气象条件评估指数	
	2021 年 平均值	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年 平均相比 (%)	2021 年 平均值 (m/s)	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年 平均相比 (%)	2021 年 平均值 (天)	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年 平均相比 (%)	2021 年 平均值 (%)	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年 平均相比 (%)	2021 年 平均值 (天)	与 2020 年相比 (天)	与近 5 年 平均相比 (天)	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年 平均相比 (%)
全国	10.0	-8.3	-4.8	2.25	2.3	1.5	109.6	-2.4	-2.7	60.5	-0.8	-0.1	33.4	-0.2	-0.4	0.4	-3.3
京津冀	8.9	-10.1	-2.2	2.02	4.7	2.0	125.8	-6.4	-0.1	62.3	2.4	6.3	34.5	8.9	11.3	-6.4	-5.5
京津冀及周边	8.7	-13.9	-6.5	2.08	7.2	4.9	111.2	-12.6	-7.5	63.4	0.9	4.6	36.4	9.6	11.5	-7.9	-6.7
长三角	10.4	-8.0	-7.1	2.20	4.8	2.4	103.4	-9.1	-4.8	75.8	-1.6	-1.5	61.1	-3.1	-0.1	-0.1	-7.0
汾渭平原	8.5	-18.3	-10.5	2.07	6.7	5.5	111.3	-14.3	-7.9	62.3	-2.7	1.4	39.7	7.1	10.4	-1.9	-7.2
珠三角	10.3	-4.6	-7.2	2.07	-3.3	0.3	102.5	4.6	-3.9	75.3	-4.3	-5.9	57.7	-8.0	-16.0	10.4	2.5
东北	9.1	-4.2	2.2	2.60	-1.1	-2.3	65.7	3.5	8.9	68.2	1.7	6.7	36.6	1.8	4.1	1.3	-3.5
华中	11.7	-6.4	-6.4	1.80	-1.1	1.4	157.9	2.3	-1.9	78.0	-2.0	-0.7	64.1	-9.1	-4.2	3.9	-4.7
西南	11.9	-1.7	0.0	1.73	-1.1	3.3	169.6	2.4	-4.2	75.4	0.3	0.2	51.4	-2.0	-2.9	7.3	-8.5
西北	9.1	-12.5	-7.1	2.00	3.6	2.4	134.7	-6.5	-3.4	57.0	-2.6	-2.7	25.3	2.3	2.5	-1.4	-8.3

注：正值表示增加；负值表示减少；静稳天气指数和 PM_{2.5} 气象条件评估指数变化值为正表示气象条件变差，为负表示气象条件变好。

主要区域划分：京津冀（北京、天津、河北）、京津冀及周边（2+26 城市）、汾渭平原（山西、陕西、河南三省共 11 地市）、长三角（上海、江苏、浙江、安徽）、珠三角（广东 9 市）、东北（黑龙江、吉林、辽宁）、华中（湖北、湖南、江西）、西南（云南、贵州、四川、重庆）、西北（陕西、甘肃、宁夏、新疆）

冬季为当年 1 月、2 月、11 月和 12 月。

2.3 臭氧污染气象条件

2021年5-9月，北方部分地区气象条件较2020年同期有利于臭氧浓度下降，南方大部地区气象条件较2020年同期不利于臭氧浓度下降。

2.3.1 降水日数

降水是影响臭氧浓度的重要气象因素，降水天气对应着云量较大，辐射较弱，较多的降水日数（日降水量大于0mm的天数）有利于臭氧浓度下降。2021年5-9月，京津冀、东北等地区降水日数较2020年同期偏多，南方大部和西北区域降水日数较2020年同期偏少；我国大部地区较近5年同期平均偏多。

全国：2021年5-9月平均为58.6天，较2020年同期偏少0.2天，较近5年同期平均偏多2.1天。

京津冀：2021年5-9月平均为54.9天，较2020年同期偏多6.1天，较近5年同期平均偏多11.9天。

汾渭平原：2021年5-9月平均为49.6天，较2020年同期偏少2.4天，较近5年同期平均偏多2.6天。

长三角：2021年5-9月平均为64.7天，较2020年同期偏少3.5天，较近5年同期平均偏多4.0天。

珠三角：2021年5-9月平均为79.3天，与2020年同期持平，较近5年同期平均偏少4.7天。

其他区域：2021年5-9月西北和西南等地降水日数较2020年同期偏少。

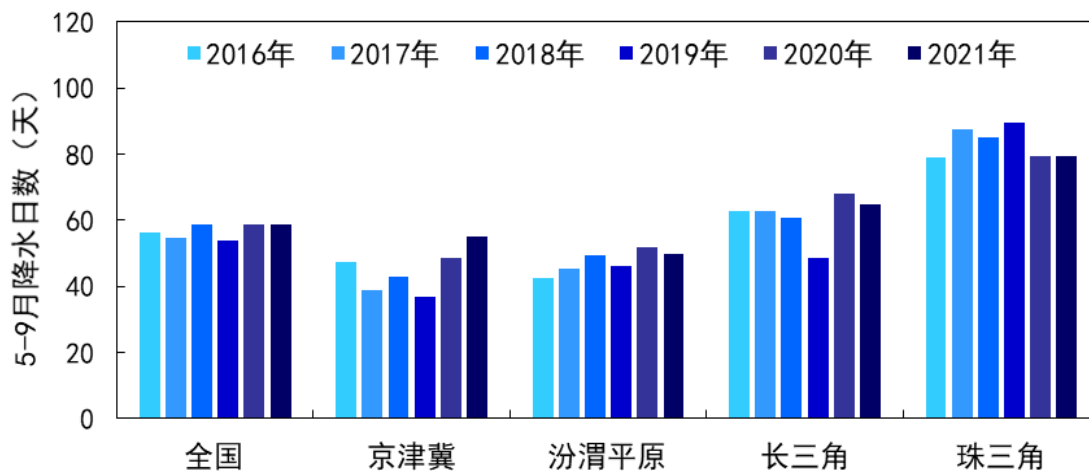


图 2.23 2016 年至 2021 年全国及重点区域 5-9 月降水日数变化

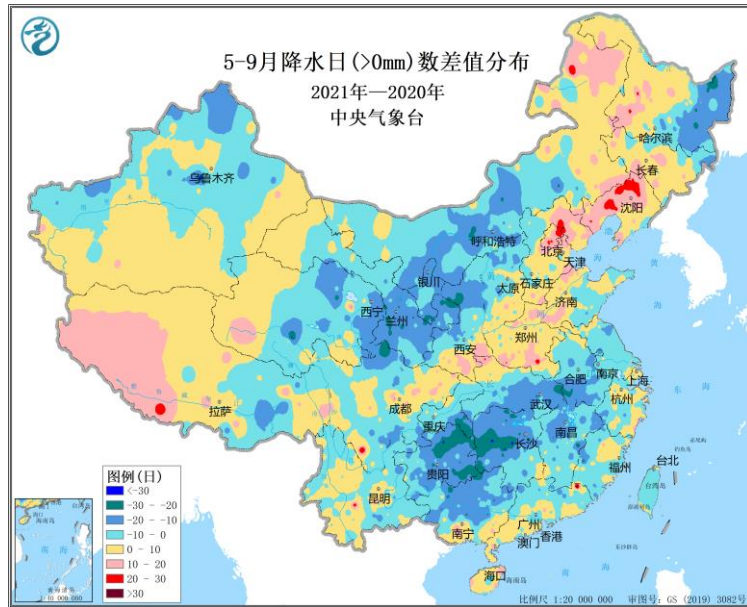


图 2.24 2021 年与 2020 年全国 5-10 月降水日数差值分布

2.3.2 辐射

辐射影响光化学反应的强弱，较强的辐射有利于臭氧的生成。2021 年 5-9 月，京津冀和东北等北方部分地区平均日总辐射曝辐量较 2020 年同期偏少，南方大部和西北地区较 2020 年同期偏多。

全国：2021 年 5-9 月平均日总辐射曝辐量为 $18.8\text{MJ}/\text{m}^2$ ，较 2020 年同期偏多 2.9%，较近 5 年同期平均偏多 0.9%。

京津冀：2021 年 5-9 月平均日总辐射曝辐量为 $18.3\text{MJ}/\text{m}^2$ ，较 2020 年同期偏少 0.8%，较近 5 年同期平均偏少 5.7%。

汾渭平原：2021 年 5-9 月平均日总辐射曝辐量为 $18.5\text{MJ}/\text{m}^2$ ，较 2020 年同期偏多 27.8%，较近 5 年同期平均偏多 15.1%。

长三角：2021 年 5-9 月平均日总辐射曝辐量为 $16.4\text{MJ}/\text{m}^2$ ，较 2020 年同期偏多 5.6%，较近 5 年同期平均偏多 0.7%。

珠三角：2021 年 5-9 月平均日总辐射曝辐量为 $15.5\text{MJ}/\text{m}^2$ ，与 2020 年同期基本持平，较近 5 年同期平均偏多 1.3%。

其他区域：2021 年 5-9 月，我国西部大部地区平均日总辐射曝辐量较 2020 年同期明显偏多，东北地区平均日总辐射曝辐量较 2020 年同期偏少。

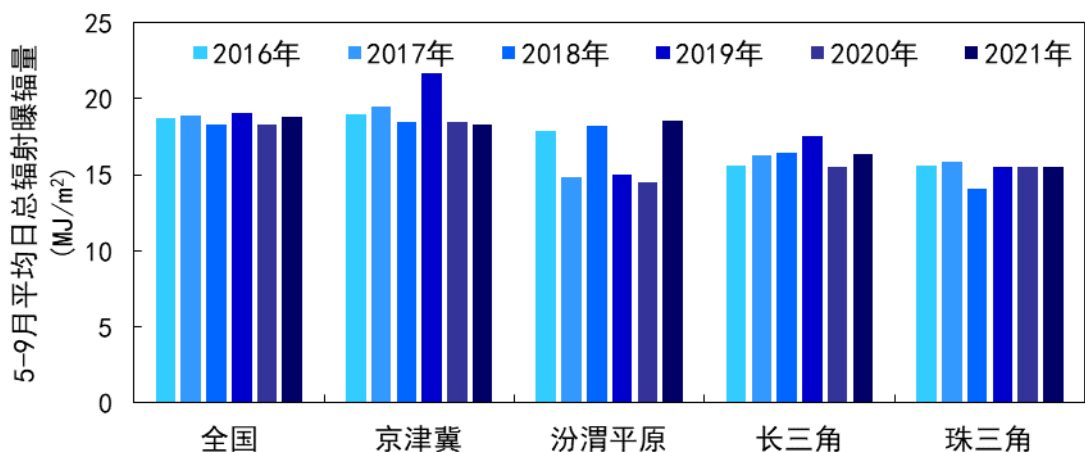


图 2.25 2016 年至 2021 年全国及重点地区 5-9 月平均日总辐射曝辐量

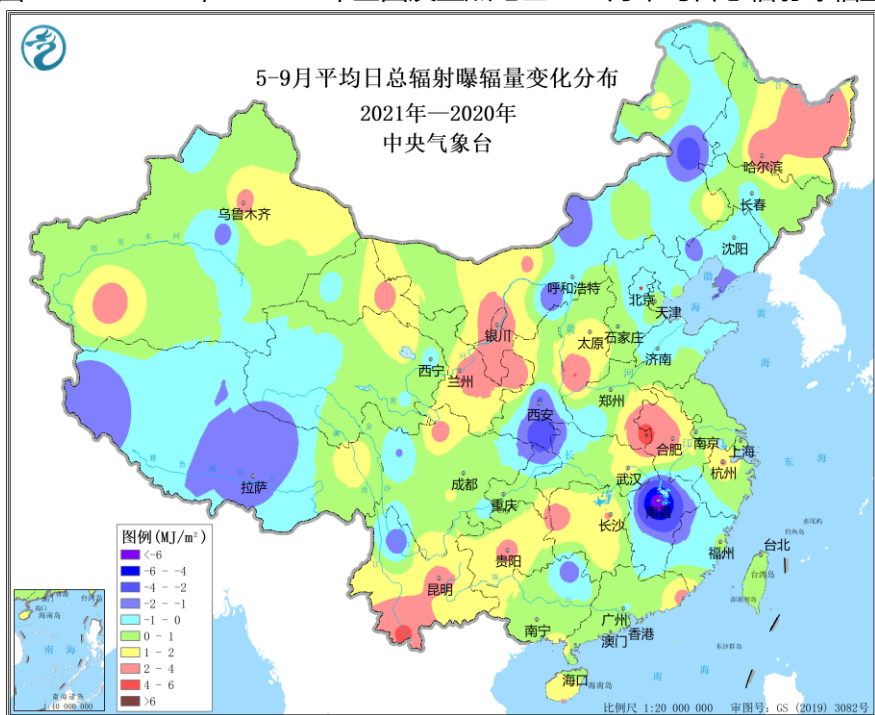


图 2.26 2021 年与 2020 年全国 5-9 月平均日总辐射曝辐量(MJ/m²)差值分布

2.3.3 高温

日最高气温是影响地面臭氧浓度的重要气象要素,较高的气温有利于光化学反应和臭氧浓度增加。2021 年 5-9 月,京津冀和东北地区日最高气温平均较 2020 年同期和近 5 年同期平均偏低,南方大部和西北地区日最高气温平均较 2020 年同期和近 5 年同期平均偏高。

全国:2021 年 5-9 月日最高气温平均为 26.2℃,较 2020 年同期偏高 0.5℃,较近 5 年同期平均偏高 0.3℃。

京津冀:2021 年 5-9 月日最高气温平均为 28.6℃,较 2020 年同期偏低

0.5°C，较近5年同期平均偏低1.0°C。

汾渭平原：2021年5-9月日最高气温平均为29.3°C，较2020年同期偏高0.6°C，较近5年同期平均偏低0.1°C。

长三角：2021年5-9月日最高气温平均为30.3°C，较2020年同期偏高0.4°C，较近5年同期平均偏高0.3°C。

珠三角：2021年5-9月日最高气温平均为33.5°C，较2020年同期偏高0.6°C，较近5年同期平均偏高1.1°C。

其他区域：2021年5-9月，我国西部大部地区日最高气温平均高于2020年同期，东北地区低于2020年同期。

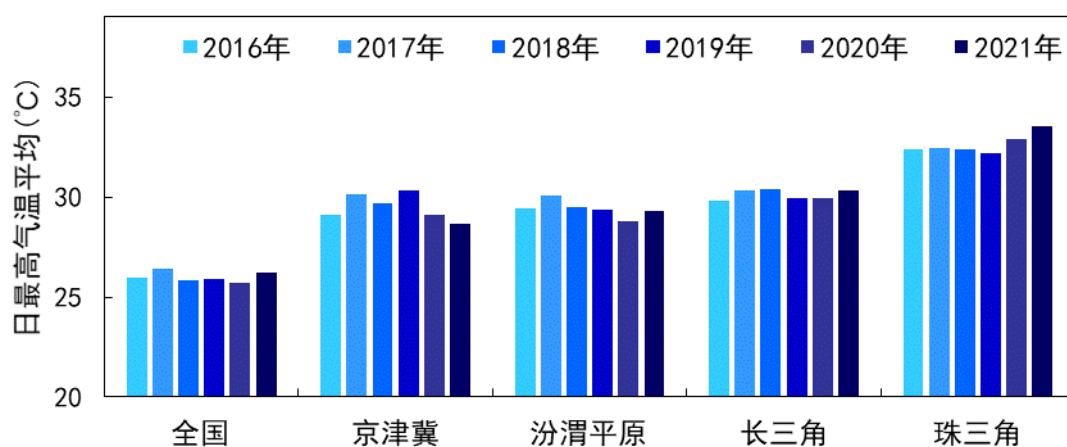


图 2.27 2016 年至 2021 年全国及重点地区 5-9 月日最高气温平均值

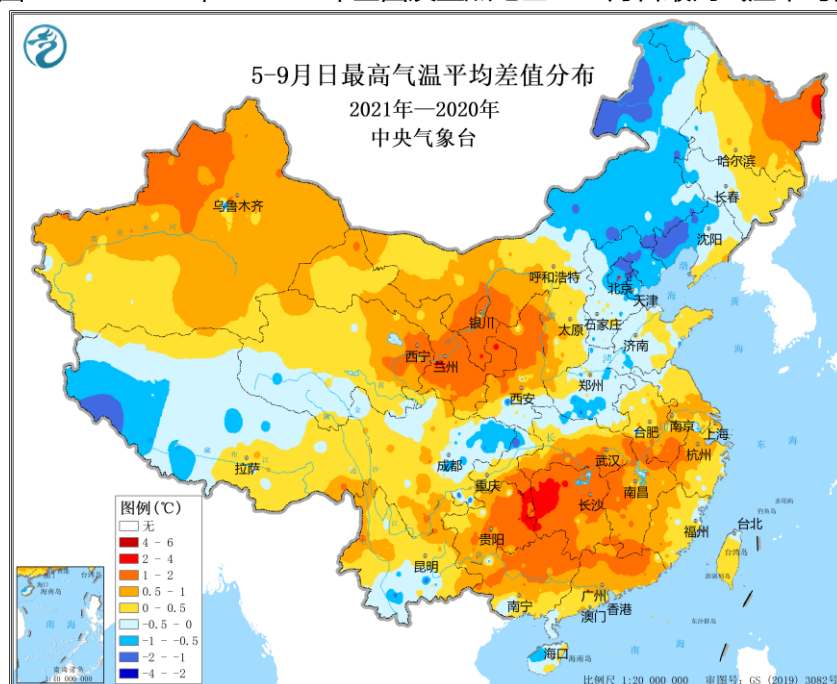


图 2.28 2021 年与 2020 年全国 5-9 月日最高气温平均差值分布

2.3.4 臭氧污染气象条件小结

2021年5-9月，京津冀等北方部分地区较2020年同期降水日数偏多、高温和辐射偏弱，气象条件有利于臭氧浓度下降；珠三角等南方大部地区较2020年同期高温和辐射偏强，气象条件不利于臭氧浓度下降；西部大部地区较2020年同期降水日数偏少、高温和辐射偏强，气象条件不利于臭氧浓度下降。

附表 2.2 2021 年全国和重点区域臭氧污染气象条件分析表

	5-9 月降水日(>0mm)数			5-9 月日最高气温平均			5-9 月日总辐射曝辐量		
	2021 年 (天)	与 2020 年相比 (天)	与近 5 年平均相比 (天)	2021 年(°C)	与 2020 年相比 (°C)	与近 5 年平均相比(°C)	2021 年 (MJ/m ²)	与 2020 年相比 (%)	与近 5 年平均相比(%)
全国	58.6	-0.2	2.1	26.2	0.5	0.3	18.8	2.9	0.9
京津冀	54.9	6.1	11.9	28.6	-0.5	-1.0	18.3	-0.8	-5.7
京津冀及周边	52.7	5.0	9.5	29.4	-0.3	-0.7	18.5	0.7	-4.0
长三角	64.7	-3.5	4.0	30.3	0.4	0.3	16.4	5.6	0.7
汾渭平原	49.6	-2.4	2.6	29.3	0.6	-0.1	18.5	27.8	15.1
珠三角	79.3	0.0	-4.7	33.5	0.6	1.1	15.5	-0.1	1.3
东北	67.3	4.1	7.2	24.9	0.1	-0.3	16.4	1.3	-6.0
华中	62.9	-10.5	-1.0	31.6	1.0	0.6	15.4	0.7	-0.8
西南	79.3	-4.2	-3.5	28.3	0.3	0.4	17.1	6.8	4.2
西北	42.0	-6.3	-5.1	27.8	0.9	0.6	21.7	3.4	2.6

注：正值表示增加；负值表示减少。

主要区域划分：京津冀（北京、天津、河北）、京津冀及周边（2+26 城市）、汾渭平原（山西、陕西、河南三省共 11 地市）、长三角（上海、江苏、浙江、安徽）、珠三角（广东 9 市）、东北（黑龙江、吉林、辽宁）、华中（湖北、湖南、江西）、西南（云南、贵州、四川、重庆）、西北（陕西、甘肃、宁夏、新疆）

全国总曝辐量观测站为 99 个。

2.4 沙尘天气气象条件

2021年，影响我国的主要沙源地受冷空气大风偏强、积雪覆盖偏少等影响，气象条件有利于沙尘天气较2020年偏多偏强。

2.4.1 冷空气大风

2021年春季（3-5月）500hPa位势平均高度场显示，极涡呈偶极型，较大的极涡中心位于极地偏欧亚大陆上空，极涡中心的位势高度较近5年平均偏低3-10位势米。因此，春季影响我国的冷空气次数偏多，强度偏强。2021年春季，我国共经历了11次冷空气过程，较近5年平均（10次）偏多1次。此外，2021年1月500hPa位势平均高度场显示，在欧亚大陆北部存在较强的极涡中心，极涡中心区域位势高度较近5年平均偏低5-15位势米，导致我国冷空气大风偏多偏强，导致2021年1月沙尘天气过程首发时间偏早。

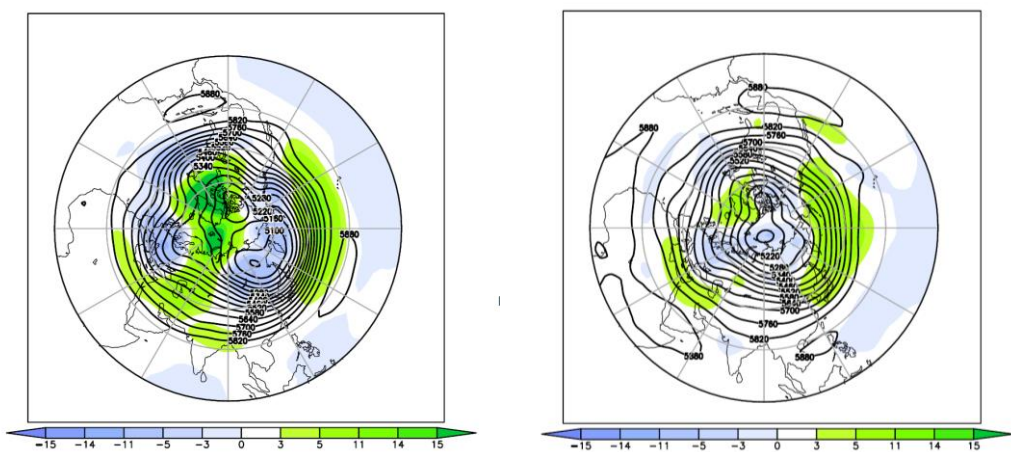


图 2.29 2021 年 1 月 (左) 和春季 (右) 500hPa 位势高度场 (实线) 及距平 (填色) (单位:gpm)

2021年春季，我国北方大部地区大风日数（小时风速大于8.0米/秒）较近5年同期平均偏多。我国沙源地的主要所在地新疆、青海、内蒙古、甘肃和宁夏五省平均大风日数较近5年平均偏多1.56天，内蒙古大部、青海北部、甘肃北部等部分地区偏多5-15天。华北南部、黄淮等地春季大风日数较2020年同期偏多，有利于沙尘粒子的传输和扩散，导致2021年我国出现沙尘天气的总面积偏大。此外，2021年1月我国沙源地主要所在的五省平均大风日数较近5年平均偏多1.87天，导致2021年沙尘天气过程出现偏早。

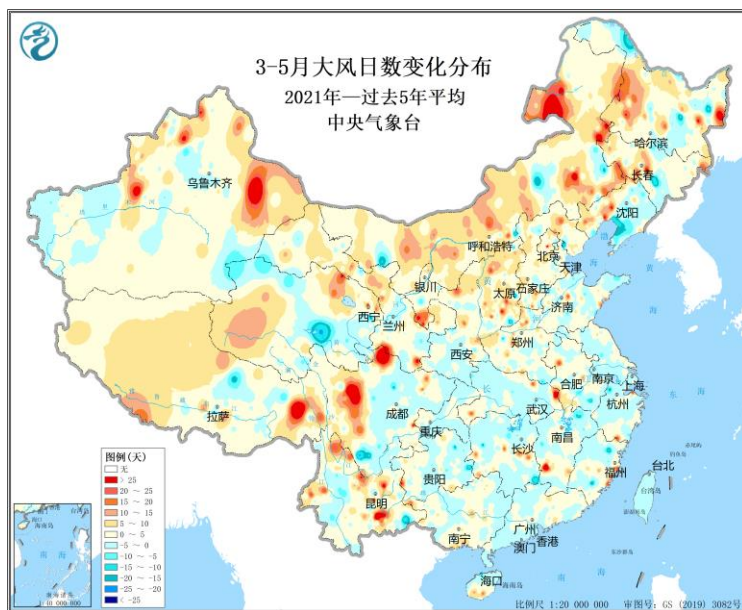


图 2.30 2021 年与近 5 年平均全国春季大风日数差值分布

2.4.2 降水量

2020 年秋季 (9-11 月), 新疆南疆盆地西部、青海、甘肃、内蒙古中西部等地降水量较 2019 年同期明显偏少, 部分地区偏少 80%以上, 不利于植被生长, 植被根系生长和土壤的水分存储保留作用偏弱, 导致对 2021 年起沙过程的抑制作用偏弱。因此, 2020 年秋季降水量偏少引起的土壤湿度和植被变化是 2021 年沙尘天气偏多偏强的原因之一。蒙古国戈壁沙漠的降水偏少和植被状况偏差, 有利于蒙古国下垫面起沙。

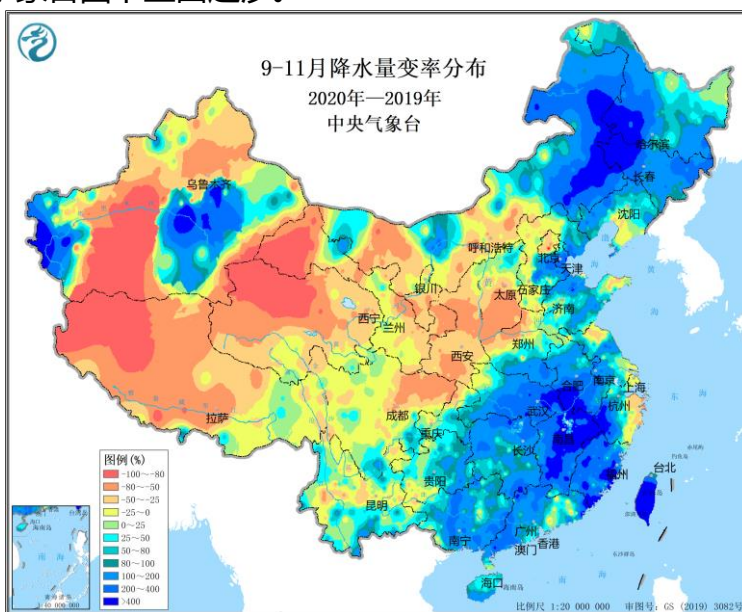


图 2.31 2020 年 9-11 月降水量较 2019 年同期变率

2.4.3 沙源地积雪

2021年2月至3月，蒙古国和我国北方地区卫星监测积雪面积较2020年同期偏少，有利于沙尘天气的发生。

2021年2月，蒙古国积雪面积约117万平方公里，主要分布在蒙古国中部和北部。我国北方十省区积雪面积为304万平方公里，主要分布在内蒙古东部和中部、新疆北部和中部、青海东北部。2021年2月，蒙古国和我国北方十省区的积雪范围较2020年同期分别偏少11.9%和17.4%。

2021年3月，蒙古国和我国北方十省区的积雪面积分别为89万和261万平方公里，与2020年同期相比积雪面积偏少15.1%和10.9%。其中，3月上旬蒙古国积雪面积较2020年同期偏少25.7%，我国北方十省区积雪面积较2020年同期偏少3.1%。

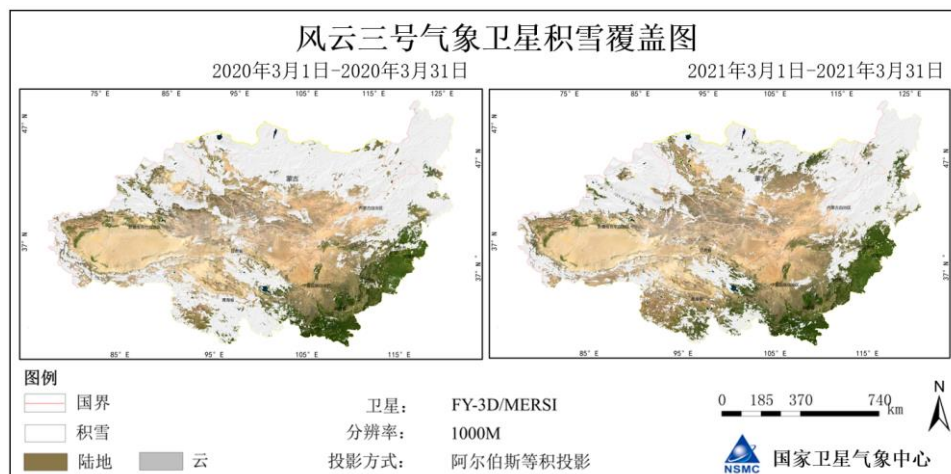


图 2.32 2020年2月(左)和2021年2月(右)风云三号气象卫星蒙古国及我国北方十省区积雪覆盖图

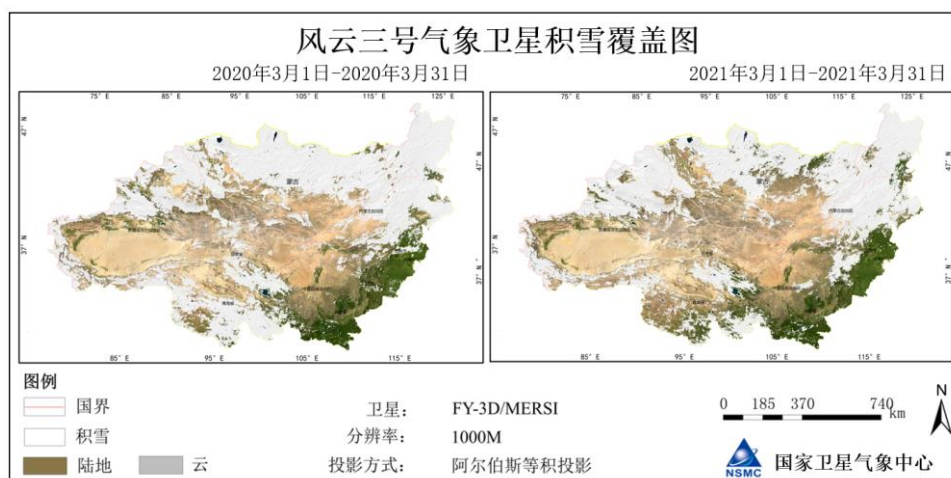


图 2.33 2020年3月(左)和2021年3月(右)风云三号气象卫星蒙古国及我国北方十省区积雪覆盖图

2.4.4 沙尘天气气象条件小结

2021年春季,影响我国的主要沙源地的气象条件总体有利于沙尘天气的发生。冷空气和大风日数较常年同期偏多,起沙动力条件强;2020年主要沙源地夏秋季降水量较往年明显偏少,不利于植被生长,同时2021年春季沙源地积雪覆盖面积偏少,均导致地表状况对起沙抑制作用偏弱。气象条件整体有利于2021年春季沙尘天气偏多偏强。华北、黄淮等地春季大风日数较2020年偏多,有利于沙尘粒子的传输,导致2021年我国沙尘天气影响面积偏大。

第三部分 结论

2021年全国大气环境持续改善。全国平均霾日数为21.3天，较2020年和近5年平均分别减少2.9和6.9天。京津冀地区霾日数为31.7天，较2020年和近5年平均分别减少6.8和19.1天。中国环境监测总站数据显示，2021年PM_{2.5}和臭氧平均浓度较2020年分别下降9.1%和0.7%。

2021年，全国平均气象条件可使PM_{2.5}浓度与2020年基本持平，较近5年平均下降3.3%。京津冀、汾渭平原等北方区域受冷空气偏强、风速偏大等影响，2021年气象条件可使PM_{2.5}浓度较2020年下降2-6%；珠三角等南方区域受有效降水日数偏少、风速偏弱等影响，2021年气象条件可使PM_{2.5}浓度较2020年升高3-10%。

2021年，京津冀等北方部分区域受5-9月降水日数偏多、高温和辐射偏弱等影响，气象条件较2020年有利于臭氧浓度下降；珠三角等南方区域受5-9月降水日数偏少、辐射和高温偏强等影响，气象条件较2020年不利于臭氧浓度下降。

2021年春季（3-5月）影响我国的主要沙源地受冷空气偏强、大风日数偏多、积雪覆盖面积偏少等影响，气象条件较2020年有利于沙尘天气的偏多和偏强。

2000年以来，我国大气环境整体呈现前期转差后期向好趋势。大部分地区霾日数由上升转为下降。东部地区PM_{2.5}背景浓度相对较高，但下降趋势更明显。2008年以来，酸雨污染状况得以改善。