

延昊,刘桂青,曹云,等. 2000—2023 年京津冀蓝天等级日数遥感研究. 应用气象学报, 2024, 35(5): 606-618.

DOI: 10. 11898/1001-7313. 20240508

2000—2023 年京津冀蓝天等级日数遥感研究

延昊^{1)*} 刘桂青²⁾ 曹云¹⁾ 莫建飞³⁾ 孙应龙¹⁾ 陈紫璇¹⁾ 程路¹⁾

¹⁾(国家气象中心, 北京 100081)

²⁾(中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081)

³⁾(广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

摘要

利用 2000 年 12 月—2023 年 12 月卫星遥感反演的气溶胶光学厚度逐日资料, 结合 2023 年每日中午地面观测蓝天资料, 基于气溶胶光学厚度得到的蓝天等级监测指标, 分析 2000—2023 年京津冀地区蓝天日数的时空变化特征及其变化趋势。结果表明: 2001—2023 年京津冀蓝天日数年平均值分别为 $144.2 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $96.3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $119.6 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, 北京蓝天日数最多, 河北次之, 天津最少。空间分布上, 河北北部年平均蓝天日数最多, 河北南部蓝天日数最少。京津冀蓝天日数具有明显季节变化, 冬季和秋季蓝天日数最多, 春季次之, 夏季最少。2001—2023 年京津冀蓝天日数年平均值均呈显著增加趋势, 每 10 年分别增加 18.1 d、22.3 d 和 16.3 d, 其中 2001—2013 年无显著趋势变化, 2013—2023 年呈增加趋势, 每 10 年分别增加 26.9 d、46.5 d 和 36.4 d。

关键词: 蓝天等级; 气溶胶光学厚度; 大气污染; 季节变化; 年际变化趋势

引言

2000 年后我国多次发生区域性大面积严重霾污染事件, 其中京津冀、黄淮地区、汾渭平原、长三角地区是我国大气污染最严重的区域, 大气污染状况、成因及其对人体健康的影响成为科研和公众的关注重点^[1-6]。2013 年我国开始实施《大气污染防治行动计划》, 随着大气污染物治理和能源结构调整, 我国中东部地区环境空气质量改善明显。2018 年我国开始实施《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 进一步提高区域大气污染防治水平, 改善环境空气质量, 显著降低了大气颗粒物浓度^[4-6]。一般而言, 重污染天气条件不易出现蓝天, 环境空气质量高, 大气颗粒物浓度低和地面能见度高天气条件下易出现蓝天, 因此蓝天具有指示环境空气质量高和大气颗粒物浓度低的气象指标潜力, 但当前对蓝天的研究报道相对较少。

在晴朗和多云天气条件下, 由于天空散射光包含的短波成分比例高, 能够观测到蓝色的天空(蓝天)。对分光光度观测的散射光光谱分布研究指出, 天空呈现的色彩可以用色温表示, 即当天气晴朗时, 天空色温增加, 天空呈蓝色; 当大气严重浑浊时, 天空色温减小, 天空呈白色^[7-8]。

对于气象观测, 云、雾、霾、沙尘、雨和雪是影响蓝天出现的天气现象。其中, 云、雾、霾、沙尘均有地面观测规范。霾指大量细微的气溶胶粒子浮游在空中, 使水平能见度小于 10 km 且空气普遍浑浊的天气现象^[9]。沙尘指沙砾、尘土悬浮在空中, 使空气浑浊, 水平能见度小于 10 km 的天气现象^[10]。霾和沙尘天气的观测均采用水平能见度小于 10 km 的监测指标。

蓝天是对垂直方向上天空色彩的观测, 目前尚缺少气象观测规范。地面观测到的蓝天主要发生在晴朗或多云(云量小于 80%)、没有霾、雾、沙尘和雨雪天气条件下。大气中的干洁空气、水蒸气和气溶胶

2024-04-25 收到, 2024-07-09 收到再改稿。

资助项目: 广西重点研发计划(桂科 AB23026052), 国家自然科学基金项目(41571327)

* 邮箱: yanhaon@hotmail.com

是影响大气透明度的主要因素。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是气溶胶消光系数在垂直方向上的积分,常用于表征气溶胶对太阳辐射的衰减特征^[11-12]。本质上,蓝天的大气透明度高,即AOD越小,大气越透明,天空越蓝。

卫星遥感已应用于大气气溶胶、大气污染颗粒物和霾研究^[13-17]。利用卫星遥感结合地面监测霾的指标是550 nm大气AOD大于0.4和550 nm近地面气溶胶消光系数大于 0.4 km^{-1} ^[14]。基于葵花静止卫星资料和机器学习建立了区域PM_{2.5}浓度监测方法^[18]。基于MODIS高时空分辨率气溶胶AOD产品(MCD19A2)研究了2011—2020年中国陆地气溶胶光学厚度的时空分布^[15]。利用北京地区MODIS AOD产品与空气污染指数计算的每日平均可吸入颗粒浓度与观测的相关系数较高,卫星遥感AOD产品可用于大气污染分析^[16]。利用太阳光度计观测的AOD对MODIS和风云三号气象卫星A星AOD产品在中国区域的反演精度进行验证分析^[17]。以上研究表明,卫星遥感AOD产品具有揭示大气污染状况的能力,与近地面大气颗粒物浓度的相关性较高,具有监测霾的潜力。

以往研究成果均未涉及蓝天的监测和时空变化。京津冀位于我国北部,包括北京和天津以及河北省的11个地级市,是工业和城市污染物排放强度较大、大气污染较严重的区域之一^[4,5,19]。本文以京津冀地区为研究区域,利用2000年12月—2023年12月逐日卫星遥感MCD19A2产品AOD资料,结合地面观测的蓝天日数资料,探究蓝天等级的遥感监测指标,京津冀地区蓝天日数的年际变化、季节变化和空间变化趋势,揭示蓝天的时空变化特征和规律。蓝天遥感研究将从新视角研究京津冀地区的大气清洁状况,为区域大气污染防治提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用的550 nm大气AOD资料是2000年12月—2023年12月逐日卫星遥感MCD19A2产品,其空间分辨率为5 km,由1 km空间分辨率MCD19A1产品AOD平均得到,记录5 km范围内所有晴空像元AOD平均值。MCD19气溶胶产品采用的反演算法是多角度大气校正(multiangle implementation of atmospheric correction, MAIAC)

算法,由辐射传输模型计算的查找表得到AOD^[20]。MCD19A2产品中还提供了每日平均云量资料,本文选择云量小于80%的AOD资料用于监测晴空和多云条件下的蓝天。

MAIAC算法充分利用TERRA和AQUA两颗极轨卫星上搭载的MODIS传感器(中分辨率成像光谱仪)在白天观测到的多角度和多像元信息,反演高时空分辨率的大气AOD^[20]。MAIAC算法得到AOD产品在欧洲和中国的精度评估显示在茂密植被区域和沙漠等亮地表区域资料具有较高精度,与地基观测AOD的相关系数为0.92~0.95^[21-22]。TERRA极轨卫星10:30(北京时,下同)过境,AQUA极轨卫星13:30过境,搭载的MODIS传感器有36个光谱波段,扫描宽度为2330 km,两个卫星组合每1~2 d可重复观测地球表面1次。

地面蓝天观测时段为2023年每日10:00—14:00,处于TERRA和AQUA卫星过境时段,目视观测内容为蓝天和非蓝天资料,为与遥感反演的AOD在垂直方向保持一致,在近垂直方向上、避开太阳方向进行观测,观测地点位于中国气象局。

1.2 蓝天等级遥感指标确定方法

根据每日卫星过境时段的蓝天和非蓝天记录,统计卫星观测的每日AOD资料频数分布,提取出蓝天等级和深蓝等级的AOD指标。

1.3 卫星遥感蓝天统计方法

根据蓝天等级和深蓝等级的遥感AOD指标,从2000年12月—2023年12月MCD19A2逐日AOD资料中识别出蓝天和非蓝天像元,从蓝天等级中识别出深蓝等级的像元。按年、季节对识别的蓝天、深蓝等级的日数分别进行累加,得到年、季节尺度的卫星观测的蓝天日数和深蓝等级日数,并分别统计北京市、天津市和河北省区域的蓝天日数和深蓝等级日数,计算平均值和标准差,采用Sen线性趋势率(KSen)^[23]和Mann-Kendall显著性检验(P_{MK})^[24],评价蓝天日数的变化趋势,并统计2001—2023年MCD19A2逐日AOD资料(平均云量小于80%)的年平均值,分析AOD的年际变化。

冬季是指12月—次年2月,时段为2000—2022年(共计23个冬季);春季(3—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月),时段为2001—2023年。年尺度(1—12月)的时段为2001—2023年。

本文插图中所涉及的中国国界和省界基于审图号为GS(2019)3082号标准地图制作,底图无修改。

2 结果与分析

2.1 蓝天等级的遥感指标

统计 2023 年北京海淀的每日蓝天观测记录和卫星 AOD 资料,得到 155 组配对资料,并制作气溶胶光学厚度直方图(图 1)。由图 1 可见,蓝天主要出现在 AOD 值不大于 0.36 的天气条件下,占比为 95.5%;其余 4.5%的蓝天出现在 AOD 为(0.36,

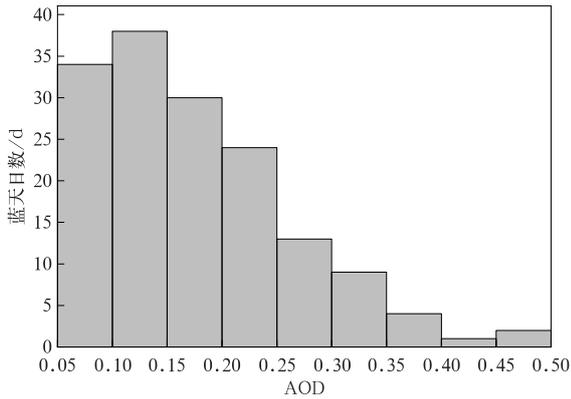


图 1 2023 年 550 nm AOD 与蓝天日数直方图

Fig. 1 Histogram of AOD at 550 nm and number of blue-sky days in 2023

0.46)条件下。这表明将 AOD 值不大于 0.36 作为蓝天等级的遥感监测指标在统计上是合理的。该蓝天监测指标小于霾遥感监测使用的 550 nm AOD 大于 0.4 的指标^[14]。

将蓝天分为两个等级,即深蓝等级和浅蓝等级,深蓝等级的 AOD 小于浅蓝等级。当以 AOD 值不大于 0.20 为深蓝等级的判别指标时,2023 年深蓝等级日数为 101 d,深蓝等级日数占蓝天总日数的 67.7%。将 AOD(0.20,0.36]作为浅蓝等级的遥感指标,浅蓝等级日数占蓝天总日数的 27.8%。

2.2 蓝天等级日数的年际变化特征

图 2 为 2001—2023 年北京、天津和河北蓝天日数和深蓝等级日数,表 1 为不同年代北京、天津和河北全年和季节的蓝天日数。由图 2 和表 1 可见,北京、天津和河北蓝天日数均呈显著增加趋势,且蓝天日数每 10 年分别增加 18.1 d、22.3 d 和 16.3 d, P_{MK} 均达到 0.01 显著性水平;北京、天津和河北的深蓝等级日数每 10 年分别增加 13.4 d、14.3 d 和 10.3 d, P_{MK} 均达到 0.01 显著性水平。

对于不同年代,2001—2013 年北京、天津和河北蓝天日数和深蓝等级日数均无显著变化(图 2 和表 1);2013—2023 年北京、天津和河北蓝天日数显

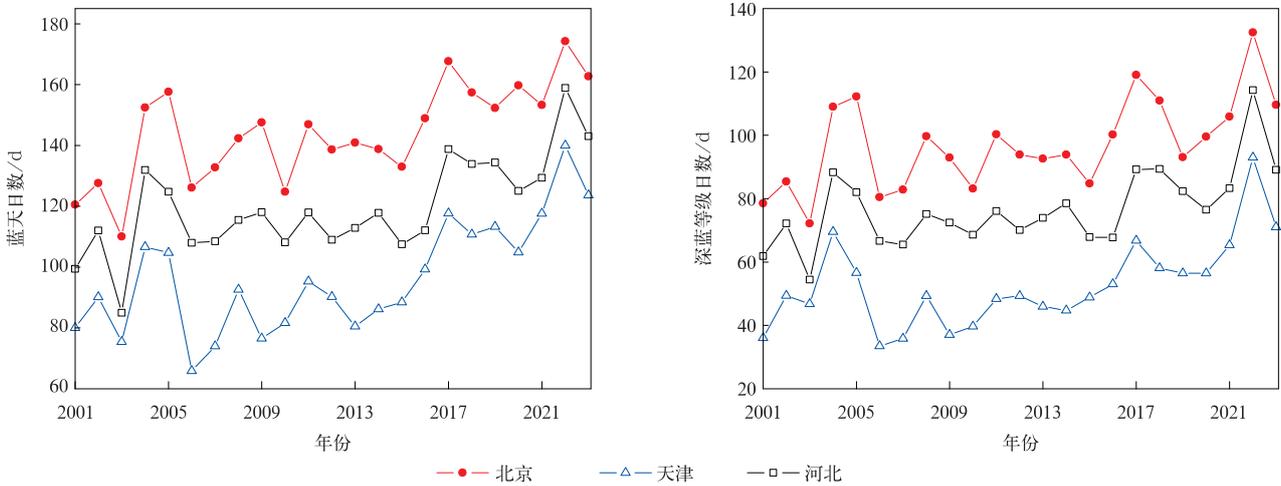


图 2 2001—2023 年北京、天津和河北蓝天日数和深蓝等级日数

Fig. 2 Numbers of blue-sky days and deep blue-sky days for Beijing, Tianjin and Hebei during 2001—2023

著增加(图 2 和表 1),每 10 年分别增加 26.9 d ($P_{MK} < 0.05$),46.5 d ($P_{MK} < 0.01$)和 36.4 d ($P_{MK} < 0.05$);天津深蓝等级日数显著增加($P_{MK} < 0.01$),每 10 年增加 27.5 d(图 2),而北京和河北深蓝等级日数无显著变化。

图 3 为不同时段北京、天津和河北全年和季节

平均的蓝天日数和深蓝等级日数。由图 3 可见,2001—2023 年北京、天津和河北的蓝天日数和深蓝等级日数差异较大,北京的蓝天日数和深蓝等级日数较天津和河北明显偏多。北京、天津和河北蓝天日数的年平均值分别为 144.2 ± 16.1 d、 96.3 ± 18.5 d 和 119.6 ± 16.0 d,北京年平均蓝天日数比天津和河

北多 47.8 d 和 24.5 d。2001—2023 年北京、天津和河北的深蓝等级日数年平均值为 97.1±14.4 d、52.6±13.9 d 和 76.8±12.4 d,分别占蓝天日数的

67.3%、54.7%和 64.2%;北京年平均深蓝等级日数比天津和河北多 44.48 d 和 20.3 d。

对于 2001—2013 年和 2013—2023 年两个时

表 1 北京、天津和河北 2001—2023 年、2001—2013 年和 2013—2023 年全年和季节的蓝天日数趋势率(单位:d·a⁻¹)

Table 1 Sen slope(unit:d·a⁻¹) of numbers of annual and seasonal blue-sky days for Beijing,Tianjin and Hebei during 2001—2023,2001—2013 and 2013—2023

时段	2001—2023 年			2001—2013 年			2013—2023 年		
	北京	天津	河北	北京	天津	河北	北京	天津	河北
全年	1.81**	2.23**	1.63**	1.67	0.189	0.62	2.69*	4.65**	3.64*
冬季	0.71	0.95*	0.67	0.81	0.07	0.63	1.59	2.46*	1.93
春季	0.39	0.33	0.36	-0.06	-0.07	-0.06	0.48	0.40	0.80
夏季	0.55**	0.49**	0.42**	0.53	0.14	0.34	0.45	1.05	0.73
秋季	0.16	0.29	0.28	0.19	0.16	-0.07	1.29	1.49*	1.24*

注:**表示趋势率达到 0.01 水平的 MK 显著性检验,*表示达到 0.05 水平的 MK 显著性检验。

段,2013—2023 年北京、天津和河北的蓝天日数和深蓝等级日数年平均较 2001—2013 年多,也比整个研究时段(2001—2023 年)多。2013—2023 年北京、天津和河北的蓝天日数年平均分别为 153.5±12.6 d、107.5±17.8 d 和 128.5±15.4 d,较

2001—2013 年分别偏多 17.5 d、21.8 d 和 16.9 d。2013—2023 年北京、天津和河北的深蓝等级日数年平均分别为 103.8±13.7 d、59.9±13.8 d 和 82.9±13.0 d,较 2001—2013 年分别偏多 12.8 d、14.0 d 和 11.6 d。

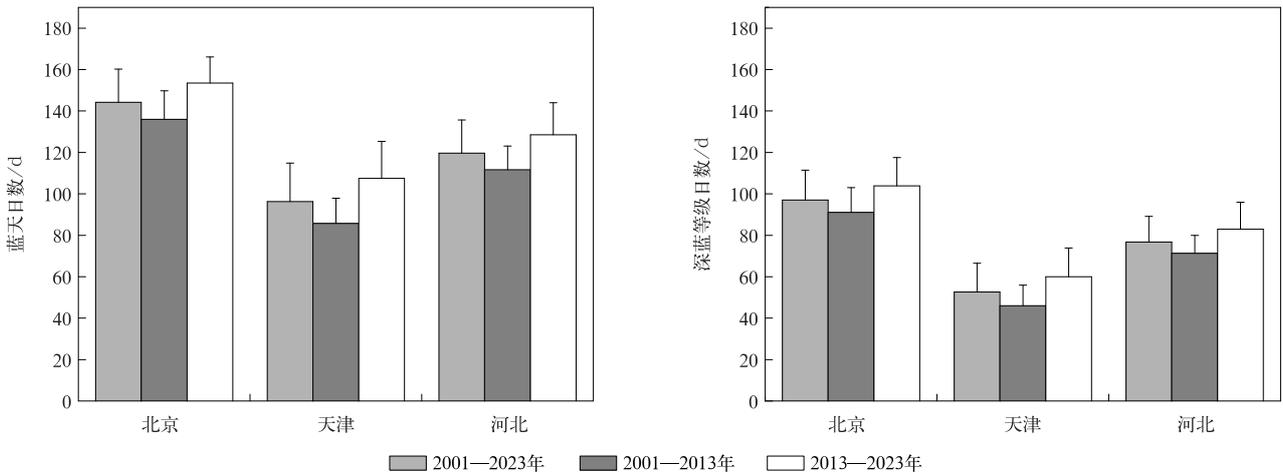


图 3 2001—2023 年、2001—2013 年和 2013—2023 年北京、天津和河北平均的蓝天日数和深蓝等级日数

Fig. 3 Numbers of blue-sky days and deep blue-sky days for Beijing,Tianjin and Hebei averaged in 2001—2023,2001—2013 and 2013—2023

2001—2023 年北京、天津和河北平均的蓝天日数和深蓝等级日数的空间差异较大(如图 4 所示)。由图 4 可见,多年平均蓝天日数和深蓝等级日数最大值主要分布在河北北部,蓝天日数为 120~200 d,深蓝等级日数为 80~160 d,最低值主要分布在河北南部,蓝天日数小于 80 d,深蓝等级日数小于 40 d。北京和天津蓝天日数分别为 80~200 d 和 80~160 d,北京和天津深蓝等级日数分别为 40~160 d 和 40~

80 d。

由图 4 可见,2001—2023 年北京、天津和河北蓝天日数和深蓝等级日数的变化趋势也存在较大差异。蓝天日数为显著增加趋势的地区主要分布在北京、天津和河北中部和南部,增加趋势为 10~25 d·(10 a)⁻¹,河北北部无显著趋势。深蓝等级日数为显著增加趋势的地区主要分布在北京、天津和河北中部和南部,北京、天津和河北中部的增加趋势为

$10 \sim 25 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 河北南部增加趋势不足 $10 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 河北北部无显著趋势。

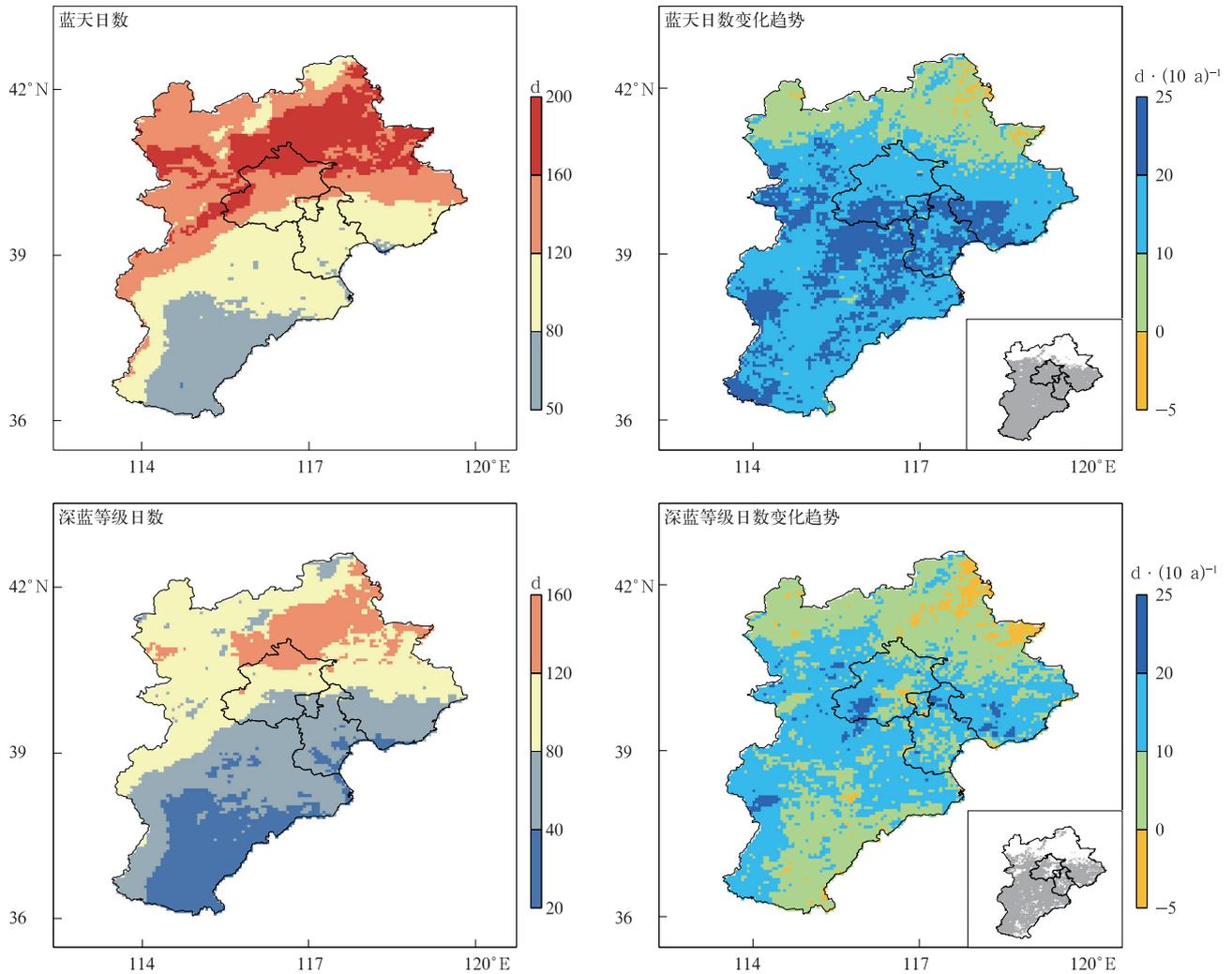


图 4 2001—2023 年北京、天津和河北平均蓝天日数和深蓝等级日数空间分布及其变化趋势率
(右下角小图中的灰色表示 $P_{MK} < 0.05$)

Fig. 4 Climatic spatial distributions and corresponding Sen slopes of numbers of blue-sky days and deep blue-sky days for Beijing, Tianjin and Hebei during 2001—2023
(the grey color denotes $P_{MK} < 0.05$ in the small hatch)

2.3 蓝天日数的季节变化特征

图 5 为不同年代北京、天津和河北季节平均的蓝天日数和深蓝等级日数。由图 5 可见, 蓝天日数和深蓝等级日数均存在明显的季节变化特征。冬季和秋季的蓝天日数和深蓝等级日数最多, 春季次之, 夏季最少。北京、天津和河北的冬季蓝天日数多年平均值分别为 $48.8 \pm 12.2 \text{ d}$ 、 $33.1 \pm 12.3 \text{ d}$ 和 $35.1 \pm 10.2 \text{ d}$, 秋季蓝天日数多年平均值分别为 $42.2 \pm 6.2 \text{ d}$ 、 $30.0 \pm 6.0 \text{ d}$ 和 $37.4 \pm 5.4 \text{ d}$, 春季蓝天日数多年平均值分别为 $32.5 \pm 7.5 \text{ d}$ 、 $21.9 \pm 6.7 \text{ d}$ 和 $28.8 \pm 6.4 \text{ d}$, 夏季蓝天日数最少, 多年平均值分别为 $21.1 \pm 6.2 \text{ d}$ 、 $11.5 \pm 5.9 \text{ d}$ 和 $19.6 \pm 5.5 \text{ d}$ 。京津冀

地区夏季蓝天日数最少, 主要是受云量、气溶胶、大气湍流和大气环流等因素的影响。夏季是京津冀地区云量最多的季节, 总云量超过 55%, 冬季总云量最少, 低于 35%^[25]。夏季也是京津冀地区 AOD 最大的季节, 这与夏季大气垂直方向湍流发展强盛、大量气溶胶颗粒物被输送到高空有关^[16]; 夏季空气湿度最大, 大气气溶胶吸湿增长, 冬季大气干燥, 湍流作用较弱, AOD 偏小^[26]。此外, 京津冀地区夏季以偏南气流为主, 河南、山东和江苏等地的大气污染物向京津冀地区输送, 加重了大气污染, 降低了蓝天出现的可能性; 冬季以西北或偏北气流为主, 带来的清洁空气有利于大气污染物的扩散^[26], 冬季大风过后

易出现蓝天。

2000—2022 年北京、天津和河北的冬季深蓝等级日数多年平均值分别为 35.8 ± 12.2 d、 19.4 ± 8.5 d 和 23.7 ± 8.9 d, 秋季深蓝等级日数多年平均值分别

为 31.3 ± 5.7 d、 19.3 ± 5.1 d 和 27.1 ± 4.3 d, 春季深蓝等级日数多年平均值分别为 18.3 ± 5.7 d、 8.8 ± 3.7 d 和 16.1 ± 4.5 d, 夏季深蓝等级日数最少, 多年平均值分别为 11.9 ± 4.2 d、 5.4 ± 3.1 d 和 11.0 ± 3.3 d。

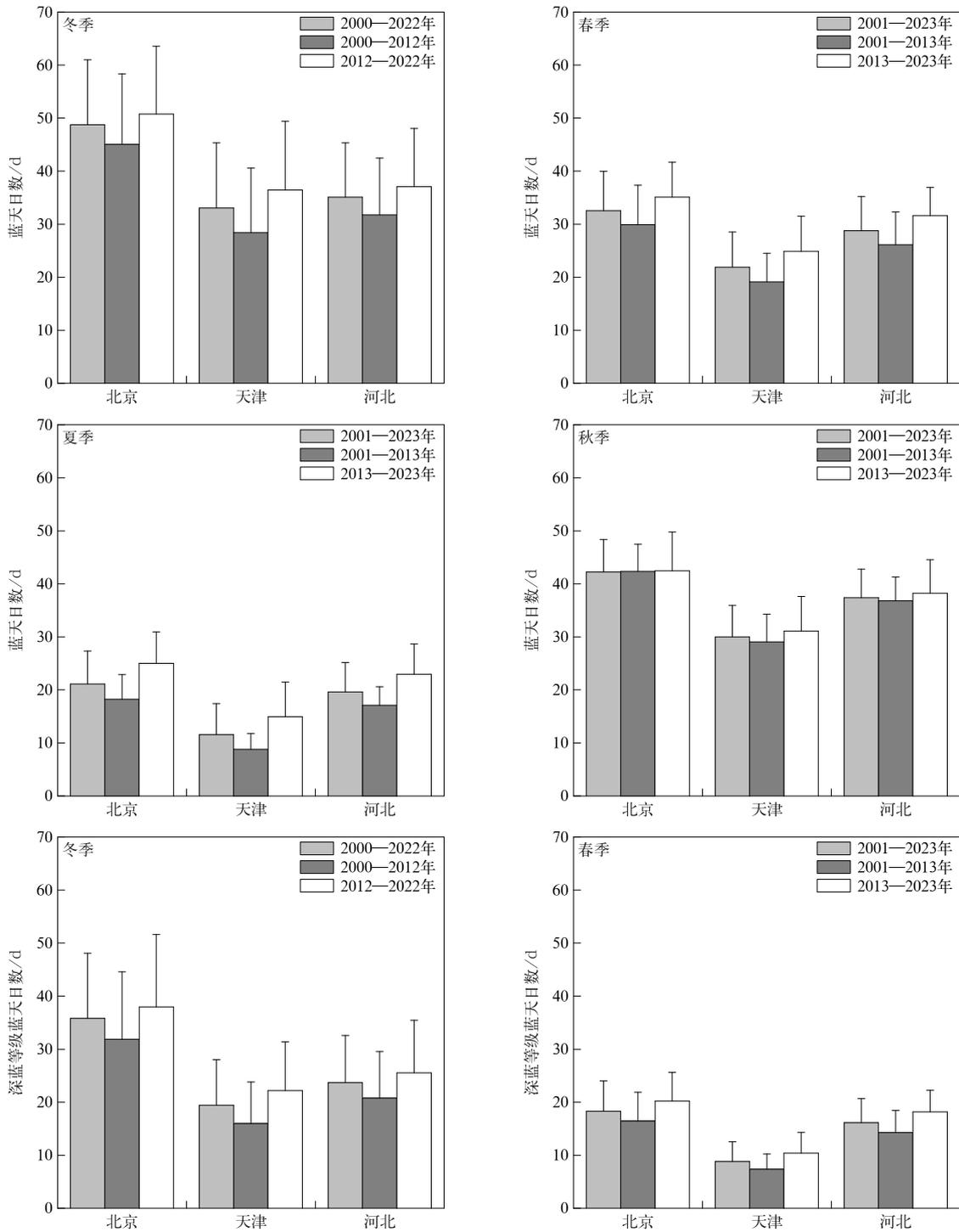
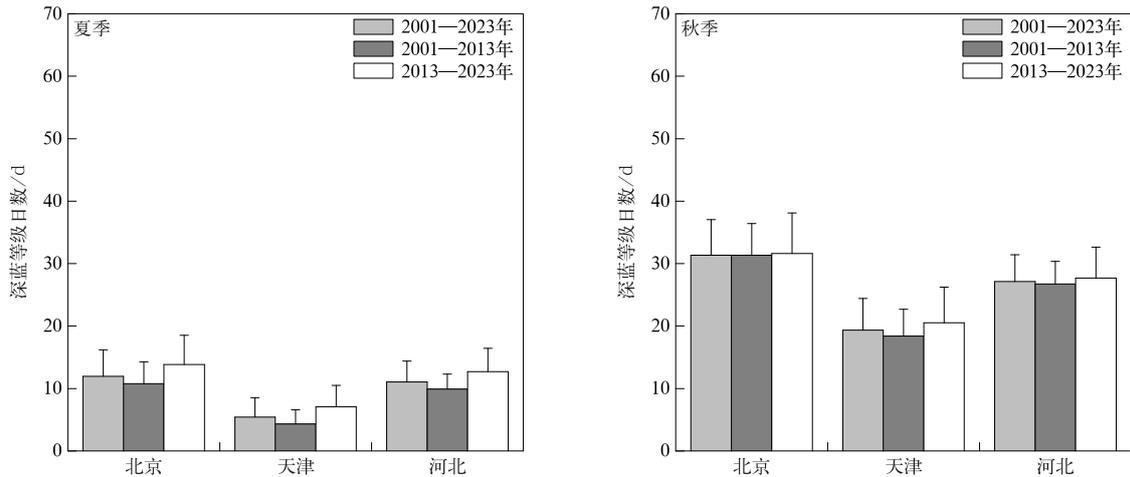


图 5 北京、天津和河北季节平均的蓝天日数和深蓝等级日数

Fig. 5 Numbers of seasonal blue-sky days and deep blue-sky days for Beijing, Tianjin and Hebei



续图 5

由图 5 还可以看到,2012—2022 年北京、天津和河北冬季和 2013—2023 年春、夏和秋 4 个季节的蓝天日数和深蓝等级日数多年平均值均比 2001—

2013 年高,也较 2001—2023 年偏高。

图 6 为北京、天津和河北季节平均蓝天日数和深蓝等级日数年际变化。由图 6 可见,2000—2022

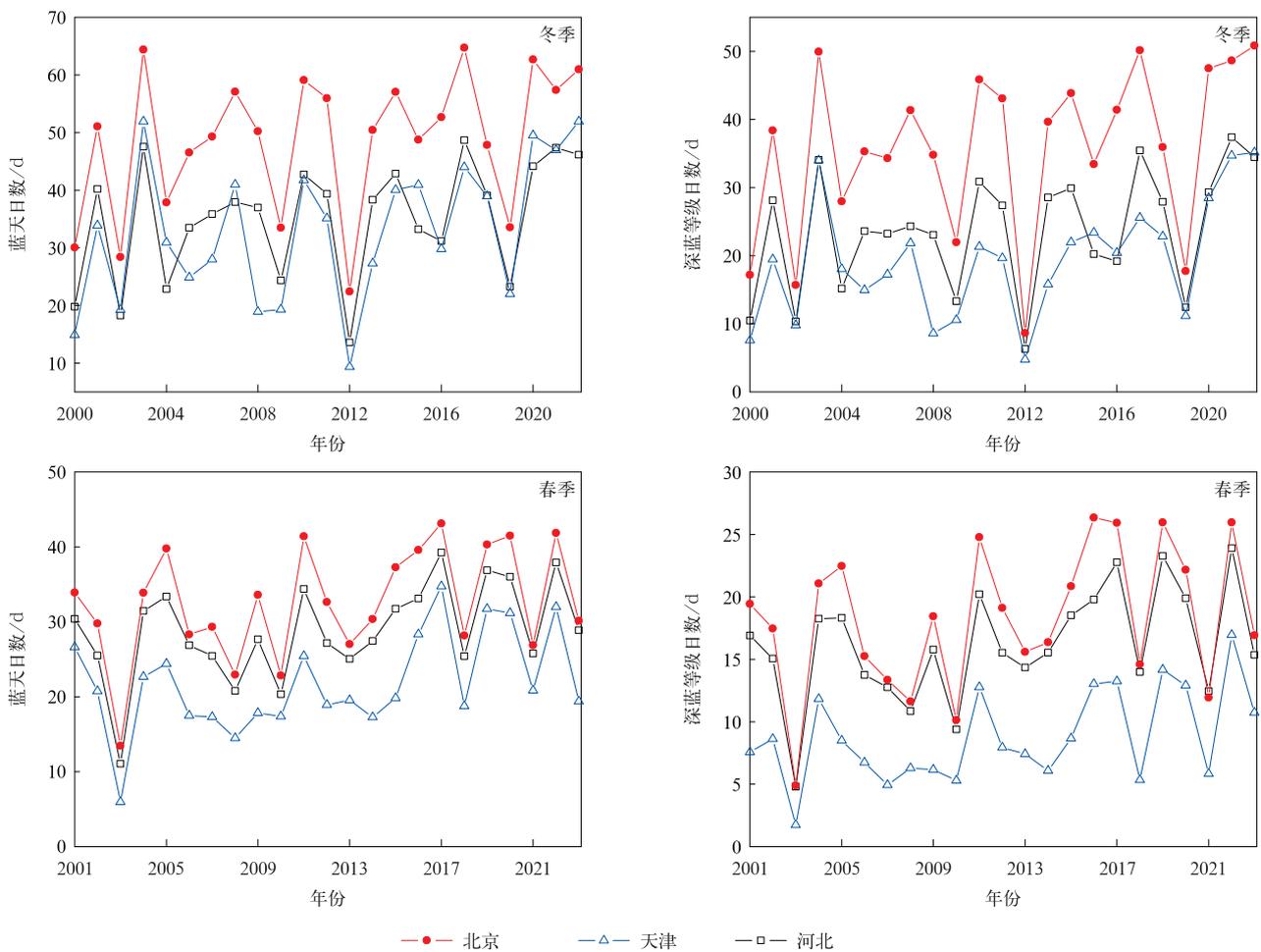
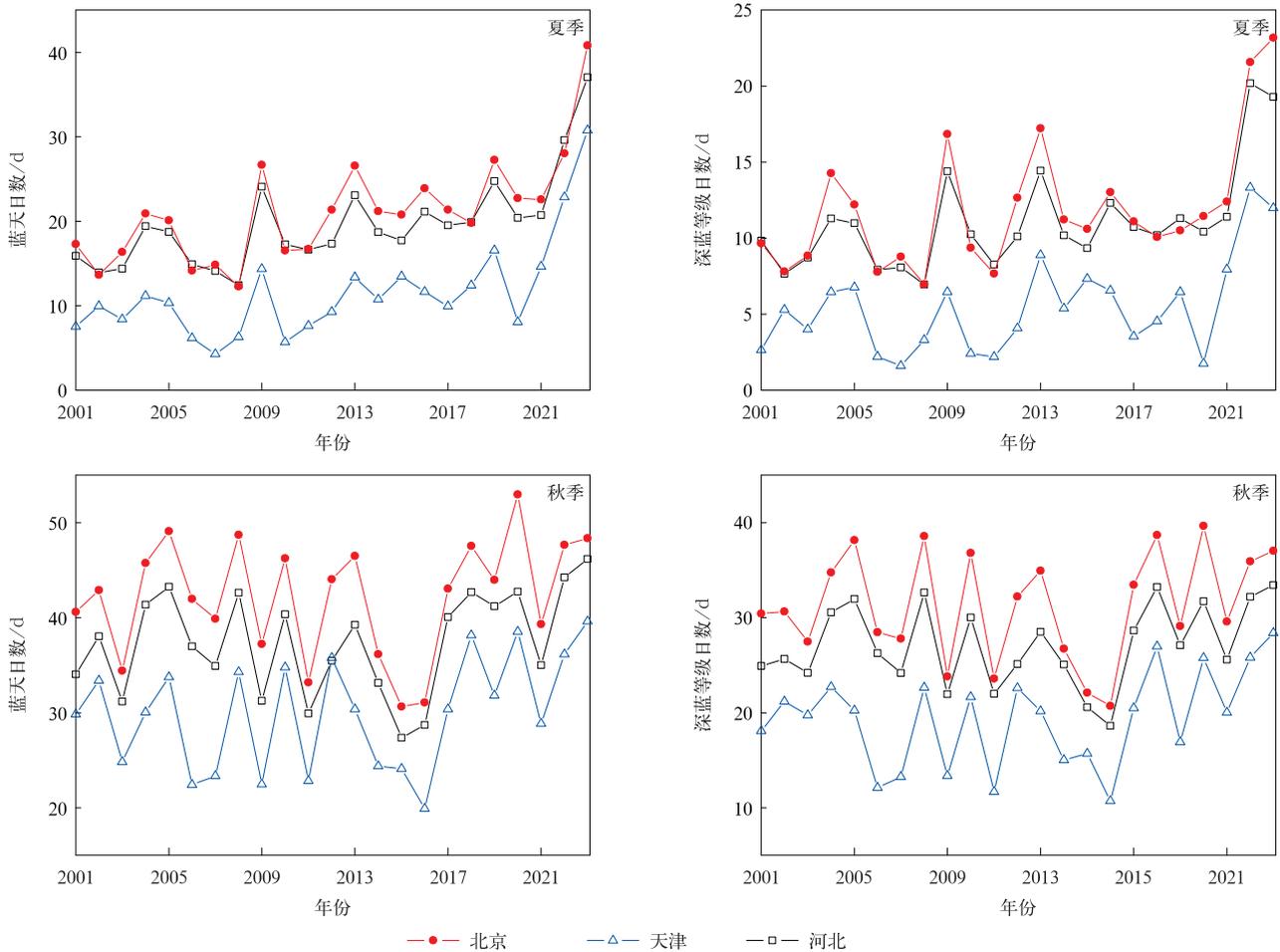


图 6 北京、天津和河北季节平均蓝天日数和深蓝等级日数年际变化

Fig. 6 Interannual variations of numbers of seasonal blue-sky days and deep blue-sky days for Beijing, Tianjin and Hebei



续图 6

年北京冬季蓝天日数最大值出现在 2017 年,为 64.7 d,最小值出现在 2012 年,仅为 22.4 d,较 2017 年偏少 42.3 d;天津冬季蓝天日数最大值出现在 2003 年和 2022 年,为 51.9 d,最小值出现在 2012 年,仅为 9.3 d,较 2022 年偏少 42.6 d。

北京、天津和河北的蓝天日数和深蓝等级日数的季节趋势也存在较大差异(图 6 和表 1)。2000—2023 年北京、天津和河北的夏季以及天津的冬季蓝天日数均呈显著增加趋势,每 10 年分别增加 5.5 d、4.9 d、4.2 d 和 9.5 d($P_{MK} < 0.05$),其他季节的蓝天日数无显著变化趋势。2000—2022 年北京和天津的冬季以及 2001—2023 年北京和河北的夏季深蓝等级日数呈显著增加趋势,每 10 年分别增加 8.1 d、7.7 d、2.3 d 和 1.9 d($P_{MK} < 0.05$),其他季节的深蓝等级日数无显著变化趋势。

对于 2001—2013 年和 2013—2023 年两个时段,2001—2013 年北京、天津和河北 4 个季节的蓝天日数和深蓝等级日数均无显著变化趋势(图 6);

2013—2023 年天津冬季蓝天日数每 10 年增加 24.6 d ($P_{MK} < 0.05$),天津和河北秋季蓝天日数每 10 年分别增加 14.9 d 和 12.4 d ($P_{MK} < 0.05$),其余的蓝天日数均无显著变化趋势。2013—2023 年天津冬季深蓝等级日数每 10 年增加 20.1 d ($P_{MK} < 0.01$),天津秋季深蓝等级日数每 10 年增加 13.5 d ($P_{MK} < 0.05$),其余的深蓝等级日数均无显著变化趋势。

2000—2023 年北京、天津和河北季节平均的蓝天日数空间分布差异明显(图 7)。由图 7 可见,河北北部季节平均蓝天日数最多,河北中部次之,河北南部季节平均蓝天日数最少;北京季节平均蓝天日数比天津多。北京、天津和河北秋季和冬季平均的蓝天日数最多,春季次之,夏季最少。北京、天津和河北蓝天日数的季节趋势差异较大。2001—2023 年夏季北京、天津和河北蓝天日数均呈显著增加趋势,大部地区每 10 年增加 4.2~5.5 d ($P_{MK} < 0.01$),而其他季节(冬季、春季和秋季)的蓝天日数无显著变化趋势(表 1)。

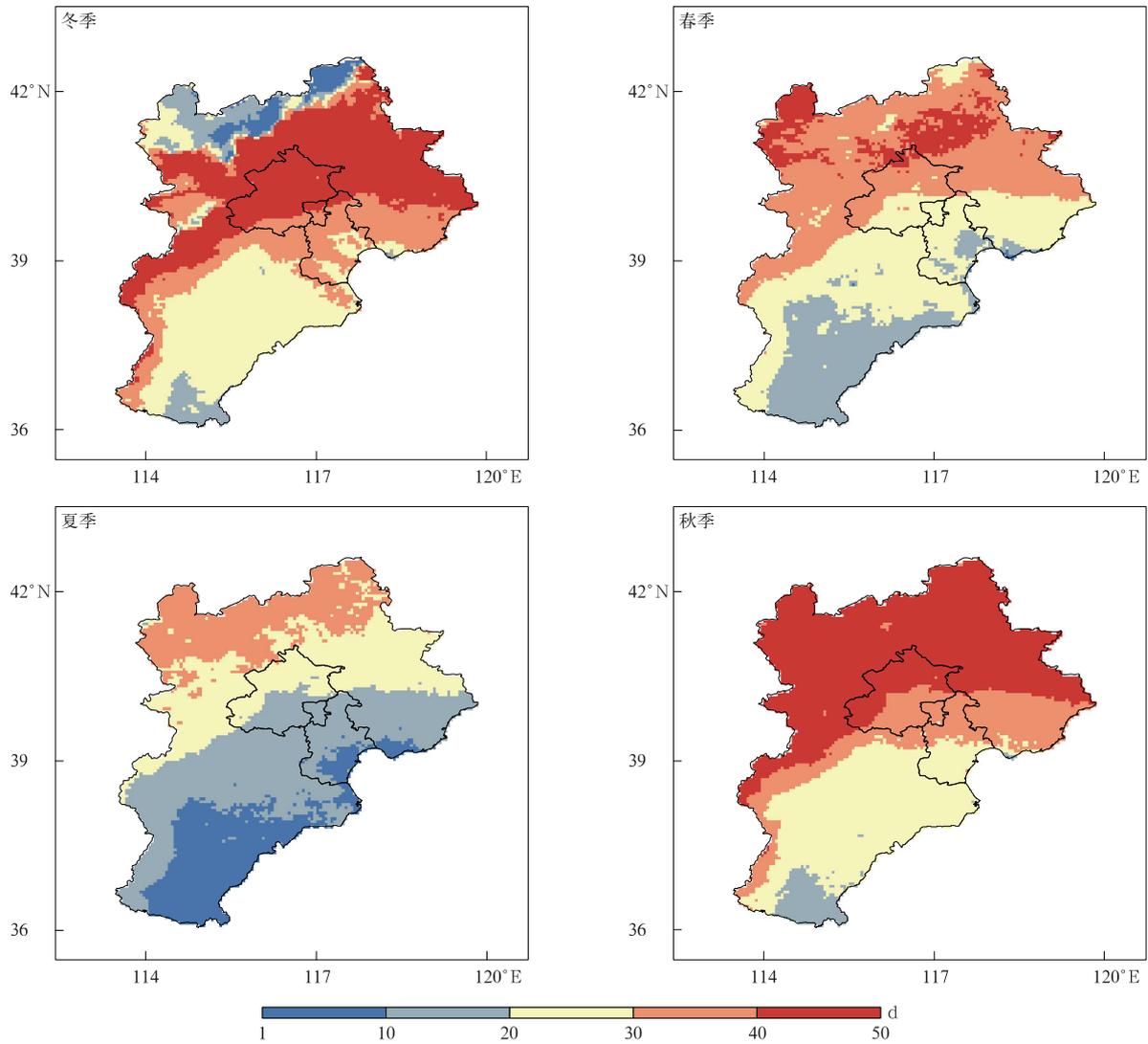


图 7 2000—2023 年北京、天津和河北季节平均蓝天日数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of number of seasonal blue-sky days for Beijing, Tianjin and Hebei during 2000—2023

2.4 气溶胶光学厚度年际变化特征

图 8 为 2001—2023 年北京、天津和河北的 AOD 年际变化。由图 8 可见,2001—2023 年北京、天津和河北年平均 AOD 均为显著减小趋势,每 10 年分别减小 0.05、0.10 和 0.07, P_{MK} 均达到 0.01 显著性水平,这主要与 2013—2023 年北京、天津和河北年平均 AOD 显著减小有关。

2001—2023 年北京、天津和河北年平均 AOD 分别为 0.36、0.53 和 0.40,天津的年平均 AOD 最高,河北次之,北京最小。2001—2013 年北京、天津和河北年平均 AOD 较大,分别为 0.39、0.58 和 0.44,而 2013—2023 年北京、天津和河北年平均 AOD 较小,分别为 0.33、0.48 和 0.37,较 2001—2013 年分

别减小 14%、18% 和 17%。

2013—2023 年京津冀年平均 AOD 显著减小可能与 2013 年京津冀地区开始实施的区域大气污染防治工作和 2018 年开始实施的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》有关。大气污染防治推动区域空气质量持续改善,促进大气污染物排放减少、形成的气溶胶颗粒物减少和 $PM_{2.5}$ 质量浓度降低^[3,4,27],例如 2020 年京津冀 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度较 2013 年下降 48%^[5],促使 2001—2023 年 AOD 持续减小,AOD 值不大于 0.36 的日数,即蓝天日数,显著增加。

蓝天和气象上的能见度、环境上的大气污染物等关系密切,人为大气污染型气溶胶和沙尘气溶胶

是影响北方地区空气质量的两大类气溶胶^[28],会造成霾天气或沙尘天气,大气颗粒物浓度很高时,能见度降低,也看不到蓝天;当大气颗粒物浓度很低时,能见度很高,易出现蓝天。由于大气气溶胶具有复杂的物理和化学特征,可影响闪电、云、降水、能见度、气温等^[29-33],蓝天与气象因子、污染物排放、能见度的复杂定量关系尚有待深究。

利用卫星遥感和地面太阳光度计反演的 AOD 多用于大气污染状况研究^[1,16,34],本研究显示卫星遥感 AOD 资料具有监测蓝天等级及其变化的能力。

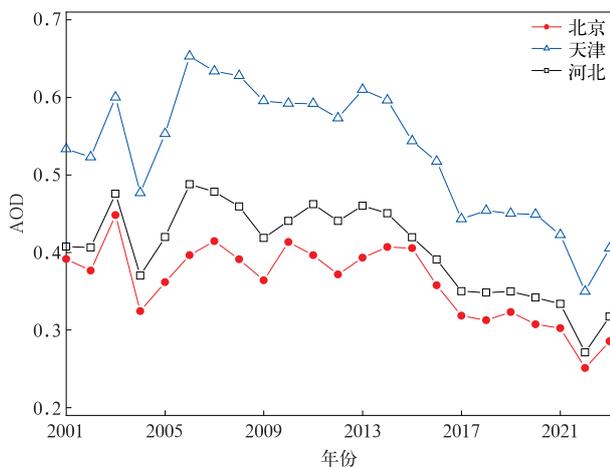


图 8 2001—2023 年北京、天津和河北 AOD 年际变化

Fig. 8 Interannual variations of AOD for Beijing, Tianjin and Hebei during 2001–2023

3 小 结

本文首次采用卫星遥感气溶胶光学厚度资料研究蓝天等级的监测指标,分析京津冀地区 2000—2023 年蓝天等级日数的时空变化特征,得到以下结论:

1) 结合地面蓝天观测和卫星 AOD 资料,提出 550 nm 大气 AOD 值不大于 0.36 为蓝天等级监测指标,AOD 值不大于 0.2 为深蓝等级监测指标,即 AOD 越小,大气越透明,天空越蓝。

2) 京津冀蓝天等级日数具有季节变化特征,2000—2022 年京津冀冬季和 2001—2023 年秋季多年平均蓝天日数最多,春季次之,夏季最少。

3) 2001—2023 年京津冀地区蓝天日数存在明显趋势。2013—2023 年京津冀蓝天日数明显增加,每 10 年分别增加 26.9 d、46.5 d 和 36.4 d。这与

2001—2023 年京津冀年平均 AOD 显著减小有关。

参 考 文 献

- [1] 颜鹏,刘桂清,周秀骥,等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性. 应用气象学报,2010,21(3):257-265.
Yan P, Liu G Q, Zhou X J, et al. Characteristics of aerosol optical properties during haze and fog episodes at Shangdianzi in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(3): 257-265.
- [2] 梁苑新,车慧正,王宏,等. 北京一次污染过程气溶胶光学特性及辐射效应. 应用气象学报,2020,31(5):583-594.
Liang Y X, Che H Z, Wang H, et al. Aerosol optical properties and radiative effects during a pollution episode in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 583-594.
- [3] 白春礼. 中国科学院大气灰霾成因与控制研究进展. 中国科学院院刊,2017,32(3):215-218.
Bai C L. Research progress on formation mechanism and control strategies of haze in Chinese academy of sciences. *Bull Chinese Acad Sci*, 2017, 32(3): 215-218.
- [4] 燕丽,雷宇,张伟. 我国区域大气污染防治协作历程与展望. 中国环境管理,2021,13(5):61-68.
Yan L, Lei Y, Zhang W. Progress and prospect of regional air pollution prevention and control cooperation in China. *Chinese J Environ Manag*, 2021, 13(5): 61-68.
- [5] 王兰英,王磊,张望. 过去十年我国大气污染防治科技工作进展及未来展望. 气候与环境研究,2022,27(6):787-794.
Wang L Y, Wang L, Zhang W. Science and technology progress on air pollution prevention and control in recent ten years and future prospect in China. *Clim Environ Res*, 2022, 27(6): 787-794.
- [6] 王文兴,柴发合,任阵海,等. 新中国成立 70 年来我国大气污染防治历程、成就与经验. 环境科学研究,2019,32(10):1621-1635.
Wang W X, Chai F H, Ren Z H, et al. Process, achievements and experience of air pollution control in China since the founding of the People's Republic of China 70 years ago. *Res Environ Sci*, 2019, 32(10): 1621-1635.
- [7] 毛节泰,王强,赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测. 气象学报,1983,41(3):322-332.
Mao J T, Wang Q, Zhao B L. The observation of the atmospheric transparency spectrum and the turbidity. *Acta Meteor Sinica*, 1983, 41(3): 322-332.
- [8] 盛裴轩. 大气物理学(第 2 版). 北京:北京大学出版社,2013.
Sheng P X. Atmospheric Physics(the 2nd Ed). Beijing: Peking University Press, 2013.
- [9] 张晓春,颜鹏,高丽娜,等. 霾的观测识别. 国家标准 GB/T 36542—2018. 北京:中国标准出版社,2022.
Zhang X C, Yan P, Gao L N, et al. Haze Identification for Meteorological Observation. National Standard GB/T 36542—2018. Beijing: China Standard Publishing House, 2022.
- [10] 牛若芸,田翠英,张恒德,等. 沙尘天气等级. 国家标准 GB/T

- 20480—2017. 北京:中国标准出版社,2017.
- Niu R Y, Tian C Y, Zhang H D, et al. Classification of Sand and Dust Weather. National Standard GB/T 20480—2017. Beijing:China Standard Publishing House,2017.
- [11] 毛节泰,李成才.气溶胶辐射特性的观测研究.气象学报,2005,63(5):622-635.
- Mao J T, Li C C. Observation study of aerosol radiative properties over China. *Acta Meteor Sinica*, 2005, 63(5): 622-635.
- [12] 范学花,陈洪滨,夏祥鳌.中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展.大气科学,2013,37(2):477-498.
- Fan X H, Chen H B, Xia X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China. *Chinese J Atmos Sci*, 2013, 37(2): 477-498.
- [13] 李婉,赵胡筋,王昌双,等.2003—2022年东北地区气溶胶光学厚度变化特征.应用气象学报,2024,35(2):211-224.
- Li W, Zhao H J, Wang C S, et al. Variation characteristics of aerosol optical depth in Northeast China from 2003 to 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(2): 211-224.
- [14] 高玲,张兴赢,吴荣华,等.卫星遥感监测技术导则 霾.国家标准 GB/T 42190—2022.北京:中国标准出版社,2022.
- Gao L, Zhang X Y, Wu R H, et al. Technical Guidelines for Satellite Monitoring—Haze. National Standard GB/T 42190—2022. Beijing:China Standard Publishing House,2022.
- [15] 郭一土,夏楠,周子钰,等.基于 MCD19-A2 数据和 GWR 模型的 2011—2020 年中国大气 $PM_{2.5}$ 质量浓度反演.农业工程学报,2023,39(5):184-191.
- Guo Y T, Xia N, Zhou Z Y, et al. Inversion of atmospheric $PM_{2.5}$ mass concentration in China from 2011 to 2020 using MCD19-A2 data and GWR model. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(5): 184-191.
- [16] 李成才,毛节泰,刘启汉,等.利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染.大气科学,2003,27(5):869-880.
- Li C C, Mao J T, Liu Q H, et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. *Chinese J Atmos Sci*, 2003, 27(5): 869-880.
- [17] 唐维尧,鲍艳松,张兴赢,等. FY-3A/MERSI、MODIS C5.1 和 C6 气溶胶光学厚度产品在中国区域与地面观测站点的对比分析.气象学报,2018,76(3):449-460.
- Tang W Y, Bao Y S, Zhang X Y, et al. Comparison of FY-3A/MERSI, MODIS C5.1, C6 and AERONET aerosol optical depth in China. *Acta Meteor Sinica*, 2018, 76(3): 449-460.
- [18] 叶昊天,邹春辉,田宏伟.一种基于机器学习和葵花 8 号数据的 $PM_{2.5}$ 浓度监测方法.气象与环境科学,2023,46(3):89-97.
- Ye H T, Zou C H, Tian H W. A method for $PM_{2.5}$ concentration monitoring based on machine learning and Himawari-8 satellite data. *Meteor Environ Sci*, 2023, 46(3): 89-97.
- [19] 苗蕾,廖晓农,王迎春.基于长时间序列的北京 $PM_{2.5}$ 浓度日变化及气象条件影响分析.环境科学,2016,37(8):2836-2846.
- Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term date. *Environ Sci*, 2016, 37(8): 2836-2846.
- [20] Lyapustin A, Wang Y J, Korokin S, et al. MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmos Meas Technol*, 2018, 11(10): 5741-5765.
- [21] Martins V S, Lyapustin A, de Carvalho L A S, et al. Validation of high-resolution MAIAC aerosol product over South America. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(14): 7537-7559.
- [22] Zhang Z Y, Wu W L, Fan M, et al. Evaluation of MAIAC aerosol retrievals over China. *Atmos Environ*, 2019, 202: 8-16.
- [23] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [24] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] 符传博,丹利,冯锦明,等.1960—2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系.大气科学,2019,43(1):87-98.
- Fu C B, Dan L, Feng J M, et al. Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012. *Chinese J Atmos Sci*, 2019, 43(1): 87-98.
- [26] 晏利斌,刘晓东.京津冀地区气溶胶季节变化及与云量的关系.环境科学研究,2009,22(8):924-931.
- Yan L B, Liu X D. Seasonal variation of atmospheric aerosol and its relation to cloud fraction over Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Res Environ Sci*, 2009, 22(8): 924-931.
- [27] 宿兴涛,冯静,安豪,等.2015—2021年京津冀典型城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染趋势变化分析.大气科学,2023,47(5):1641-1653.
- Su X T, Feng J, An H, et al. Trends analysis of fine particulate matter and ozone pollution in typical cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2015—2021. *Chinese J Atmos Sci*, 2023, 47(5): 1641-1653.
- [28] 延昊,矫梅燕,赵琳娜,等.中国北方气溶胶散射和 PM_{10} 浓度特征.高原气象,2008,27(4):852-858.
- Yan H, Jiao M Y, Zhao L N, et al. Characteristics of aerosol light-scattering and PM_{10} concentration in North China. *Plateau Meteor*, 2008, 27(4): 852-858.
- [29] 刘非凡,郑永光,罗琪,等.京津冀及周边一般性降水与短时强降水特征对比.应用气象学报,2023,34(5):619-629.
- Liu F F, Zheng Y G, Luo Q, et al. Comparison of characteristics of light precipitation and short-time heavy precipitation over Beijing, Tianjin, Hebei and neighbouring areas. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 619-629.
- [30] 吴啸天,王晓妍,郑栋,等.不同类型气溶胶对长三角地区地闪活动影响.应用气象学报,2023,34(5):608-618.
- Wu X T, Wang X Y, Zheng D, et al. Effects of different aerosols on cloud-to-ground lightning activity in the Yangtze Riv-

- er Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 608-618.
- [31] 周青, 李柏, 张勇, 等. 基于北京多源资料的云宏观特征判识. *应用气象学报*, 2023, 34(2): 206-219.
Zhou Q, Li B, Zhang Y, et al. Identification on cloud macroscopic physical characteristics based upon multi-source observations in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(2): 206-219.
- [32] 刘冬韡, 穆海振, 贺千山, 等. 一种基于实景图像的低能见度识别算法. *应用气象学报*, 2022, 33(4): 501-512.
Liu D W, Mu H Z, He Q S, et al. A low visibility recognition algorithm based on surveillance video. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(4): 501-512.
- [33] 齐道日娜, 何立富. 2022年我国夏季极端高温阶段性特征及成因. *应用气象学报*, 2023, 34(4): 385-399.
Chyi D, He L F. Stage characteristics and mechanisms of extreme high temperature in China in summer of 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 385-399.
- [34] 杨先逸, 车慧正, 陈权亮, 等. 天空辐射计观测反演北京城区气溶胶光学特性. *应用气象学报*, 2020, 31(3): 373-384.
Yang X Y, Che H Z, Chen Q L, et al. Retrieval of aerosol optical properties by skyradiometer over urban Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 373-384.

Remote Sensing Study on Blue-sky Days in Beijing, Tianjin, and Hebei During the Period of 2000—2023

Yan Hao¹⁾ Liu Guiqing²⁾ Cao Yun¹⁾ Mo Jianfei³⁾ Sun Yinglong¹⁾ Chen Zixuan¹⁾ Cheng Lu¹⁾

¹⁾ (National Meteorological Center, Beijing 100081)

²⁾ (CMA Earth System Modeling and Prediction Center, Beijing 100081)

³⁾ (Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022)

Abstract

Blue sky often represents better air quality and lower air pollution. Using satellite aerosol optical depth (AOD) data of Beijing, Tianjin and Hebei Province from 2000 to 2023, combined with the blue-sky data observed at noon time in 2023, a blue-sky grade index is established based on satellite AOD, in which the monitoring index of blue-sky grade is the AOD at 550 nm less than 0.36, and that of deep blue-sky grade is the AOD at 550 nm less than 0.2.

Spatial and temporal characteristics of blue-sky grade days in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2023 are investigated. Results show that the multi-year average blue-sky days in Beijing, Tianjin, and Hebei are $144.2 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, $96.3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, and $119.6 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively, with the highest number of blue-sky days for Beijing, followed by Hebei and the lowest number is recorded in Tianjin. In terms of spatial distribution, the northern part of Hebei has the highest annual average of blue-sky days, while the southern part of Hebei has the lowest number of blue-sky days. The number of blue-sky days in Beijing-Tianjin-Hebei exhibits noticeable seasonal changes, with the highest number of blue-sky days in winter and autumn, followed by spring, and the lowest in summer.

From 2001 to 2023, the average annual number of clear-sky days in Beijing, Tianjin, and Hebei takes on an increasing trend, with an increase of 18.1 d, 22.3 d and 16.3 d per decade, respectively. There is no significant trend change from 2001 to 2013. However, the annual average blue-sky days in Beijing-Tianjin-Hebei from 2013 to 2023 all show increasing trends, with increments of 26.9 d, 46.5 d, and 36.4 d per decade, respectively. The annual average blue-sky days and deep blue-sky days in Beijing-Tianjin-Hebei from 2013 to 2023 are higher than those in 2001—2013, with the annual average blue-sky days in Beijing, Tianjin, and Hebei of 153.5 d, 107.5 d, and 128.5 d, respectively, which are 17.5 d, 21.8 d, and 16.9 d higher than those in 2001—2013. It may be largely due to the implementation of regional air pollution prevention and control measures, which have led to a reduction in atmospheric particulate matter concentration since 2013.

Key words: blue-sky grade; aerosol optical depth; atmospheric pollution; seasonal variation; interannual trends