

卓鸿,张伟,袁铭芳,等.华北霾日的时空分布特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(3):72-79.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.03.010

华北霾日的时空分布特征分析¹

卓 鸿¹,张 伟¹,袁铭芳¹,王 冀^{2*}

(1.民航华北空管局气象中心,北京 100621;2.北京市气象局气候中心,北京 100081)

摘 要: 利用 1961—2011 年共 51 a 华北地区 50 个站冬季及 12 月—2 月逐月不同级别的霾日资料,研究了华北地区霾日的时空分布特征,结果发现:霾日的分布很不均匀,霾日大值区大多为工业城市、高度发达的城市以及煤炭生产基地,“浊岛”现象明显,华北地区霾日大值区呈西南—东北向分布,来自京津冀外区域的污染物跨城市群输送的影响非常显著。研究还表明,除山西平均霾日一直呈增长趋势外,其他地区霾日近年均呈下降趋势。从各大城市的变化特点看,太原、石家庄和呼和浩特呈一致的增长趋势,济南市、北京市和天津市的霾日均呈下降趋势。大城市冬季霾日出现最多的集中在 12 月和 1 月。

关键词: 霾日;华北;时空分布;霾等级

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2019)03-0072-08

近年来,随着我国城市化、工业化和交通运输现代化的发展,化石燃料(煤、石油、天然气)的消耗量迅猛增加,汽车尾气、燃油、燃煤、废弃物燃烧直接排放的气溶胶粒子和气态污染物通过光化学反应产生的二次气溶胶污染物日增,使得霾现象日趋严重,已经成为一种新的灾害性天气^[1],例如 2013 年 1 月发生在中国东部的强霾事件^[2-5],京津冀地区污染天数达到 27 d,北京市达到极重污染程度,因此对霾天气的研究变得非常迫切。

2003 年,我国首次使用“霾”概念^[6],将雾与霾进行了区别研究。越来越多的专家认为,雾和霾分别属于不同的天气现象,应该雾和霾分别进行研究。对全国和区域性霾日的研究已有一些,例如高歌^[7]利用 1961—2005 年中国霾日资料,对中国霾的时空气候分布特征、变化趋势进行了分析,并探讨了霾变化的可能原因及其与太阳总辐射、日照时数变化的关系。他的研究表明,华北地区为霾的三个多发区之一,并且冬季出现的日数偏多。宋连春等的研究^[8]表明 1961—2012 年华北地区的霾日数呈增长趋势。胡

亚旦和周自江的研究^[9]也表明华北中部和西部是霾天气的多发区,人口比较密集的大城市和煤矿基地是霾的高频区,“浊岛”现象明显。史军等^[10]对华东霾日的变化成因进行了分析,认为气象条件的变化、城市化和土地利用变化以及大气污染物排放的增加等所引起的区域气温升高和城市热岛效应增强,是霾日数增多的原因。

研究表明,相对湿度 90% 的阈值是区分轻雾和霾的辅助判据^[5-13],因此直接使用地面观测资料造成相对湿度阈值定得太低,容易将大量霾记成轻雾。吴兑等利用相对湿度 90% 的阈值对中国大陆的霾日重新进行了划分和分析,认为中国大陆 12 月和 1 月霾天气日数明显偏多,华北的霾日在 50 年代较多,而后逐渐减少,70 年代逐年增加,20 世纪 80—90 年代基本维持在每年 200 d 左右,21 世纪以来逐渐减少到每年霾日数 80 d 左右。孙彧等^[14]利用相同的标准对 1971—2010 年的中国霾日数进行了分析,结果表明,霾日的分布很不均匀,与城市工业化程度密切相关,重霾污染区大都是在工业城市以及高度发达的城市。对比前 30 a 和后 10 a 的霾日数分布发现,前者高值区在华北地区,而后者则为长三角、珠三角地区。京津冀城市群是华北地区城市群的主体,赵普生等^[15]京津冀区域的霾天气特征进行了分析,他们的研究发现,京津冀地区夏季和冬季霾日数较

收稿日期:2018-04-17;修回日期:2018-05-30

基金项目:北京市科委中央引导地方专项资金项目(Z161100004516018)

作者简介:卓鸿(1968—),高级工程师,主要从事中尺度强对流系统,气候研究。E-mail: zhuohong_zh@163.com

通讯作者:王冀(1972—),正研级高级工程师,主要从事气候变化与气候预测研究。E-mail: wangji_zl@163.com

高,霾日高值区主要位于城市区域,其中北京、天津、保定、石家庄、邯郸和邢台等地最为明显。

还有一些研究关注天气分析、诊断分析及模式分析等^[16-17],这些研究使我们对全国及区域性霾日的分布有了一个大概的了解,虽然华北地区是霾多发区,但对其研究仍然偏少,未利用相对湿度对地面观测数据进行订正,对华北地区冬季不同等级霾日的分布特征也缺少研究。本文针对这些不足,用相对湿度对地面观测数据进行订正后,分析华北地区冬季霾日的时空分布特征,并将霾日进行级别划分,分析不同级别霾日的时空分布特征。

1 资料与方法

本研究使用 1961—2012 年中国地面定时观测数据中 02、08、14 时和 20 时 BT 的观测资料,该资料经过国家气象信息中心最新整编,并经过严格的质量控制和检验。在这 4 个时次中任何一个时次出现能见度<10 km,相对湿度<90%的天气现象定义为一个霾日,并且排除降水、吹雪、扬沙、沙尘暴和浮尘等天气现象对能见度的影响。

值得特别说明的是,根据中国气象局《气象观测暂行规范(地面部分)》的观测方法中能见度的观测,能见度以等级记录,分为 0~9 共 10 个等级,自 1980 年开始,执行新的《地面气象观测规范》,能见度以千米记录。由于 1980 年前后记录方式上不一致,因此需要对资料进行一致性处理,本文在建立长期气候序列时,将 1980 年之后的数据转换为等级,相应地,霾也按照能见度划分为 4 个等级(表 1)。

经过对数据进行缺测检验,选取华北 50 个观测站为研究对象,范围为(31°~44°N,109°~119°E),站点分布见图 1,其中包括山东(图中 SD)7 个站,天津(TJ)2 个站,北京(BJ)1 个站,河北(HB)13 个站,山西(SX)13 个站,内蒙(NM)13 个站。

按照能见度将霾的级别 4 个等级(表 1)。

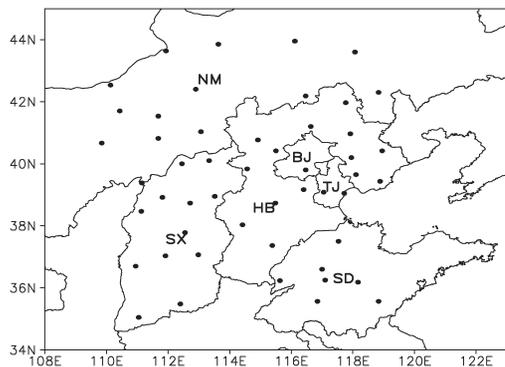


图 1 华北霾观测点分布

表 1 气候序列中雾和霾的等级标准

| 等级 | 污染程度 | 能见度/km | 1961—1979 年对应等级 |
|-----|------|--------|-----------------|
| 1 级 | 轻微 | 4~10 | 6 |
| 2 级 | 轻中度 | 2~4 | 5 |
| 3 级 | 重度 | 1~2 | 4 |
| 4 级 | 极重度 | <1 | 0~3 |

霾日的变化趋势,使用线性倾向估计方法^[18],用决定系数 R^2 来表征趋势线拟合程度。 R 的数值大小可以反映趋势线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度,拟合程度越高,趋势线的可靠性就越高。 R 平方值是取值范围在 0~1 之间的数值,当趋势线的 R 平方值等于 1 或接近 1 时,其可靠性最高,反之则可靠性较低。

在空间分布上,观测站点之间的实际平均距离大约为 50 km,因此将站点资料插值成 0.04° 的格点,第一猜想半径为 50 km。

2 结果分析

2.1 华北地区霾日的空间分布特征

2.1.1 1961—2011 年冬季年平均空间分布特征

图 2a 是华北地区 1961—2011 年冬季年平均霾日的空间分布图。从整个华北地区来看,平均霾日最多的是河北省保定市(76.5 d/a);其次为天津和济南(分别为 76.2 d/a 和 71.8 d/a),各省会城市中最少的是呼和浩特(平均霾为 59.4 d/a),说明霾日大值区与城市人口有很好的对应关系(保定除外),例如北京、天津、石家庄、太原和济南等均为大城市,人口密集,车辆多,污染物的排放量大;其他中小城市的平均霾日明显偏小。

从图 2 中还可以看出,霾日的大小分布不均,没有连续性。胡亚旦等^[9]认为,人口比较密集的大城市和煤矿基地是霾的高频区,“浊岛”现象明显,本文的研究结果也证实了霾日与城市煤、粉尘的排放量有直接关系,例如,山东省南部的兖州市以及山西省大同市,由于是重要的产煤基地,平均霾日也分别达到 55.4 d/a、53.4 d/a。但胡亚旦等^[9]研究结果认为霾多发区位于华北的西部,而从图 2 来看,霾多发区位于华北的中部和东部。

霾日的大值区呈西南—东北走向,从山西的太原(中心值为 70.8 d/a)到河北的保定(中心值为 76.5 d/a)、天津(中心值 76.2 d/a)和唐山(中心值为 63.9 d/a),霾日大值区呈带状排列。北京位于保定的

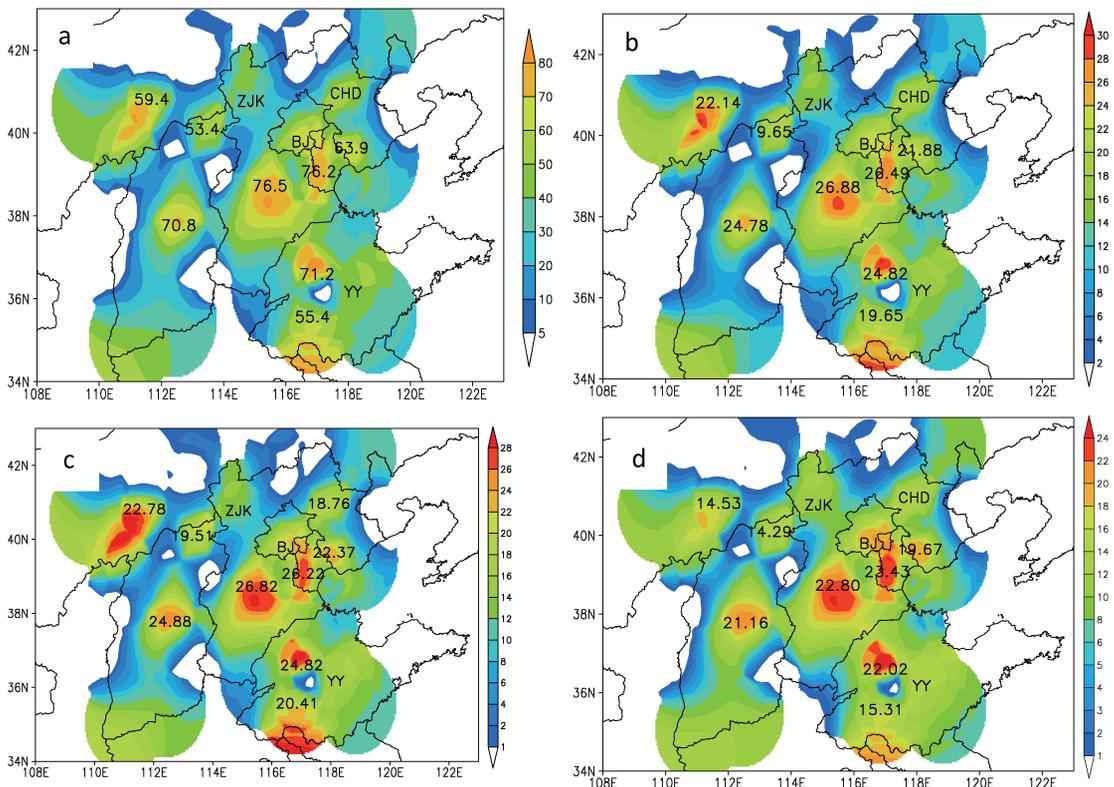


图2 (a)1961—2011年冬季年平均霾日;(b)~(d)分别为12月、1月和2月年平均霾日
(图上数字为相应位置的城市的霾日数,缩写字母BJ、CHD、ZJK、YY分别代表北京市、承德市、张家口市和沂源市)

东北方向,平均霾日达到 62.1 d/a。位于北京东北方向的承德市(图 2a 中 CHD)、位于大同东北方向的张家口市(ZJK)和位于兖州市东北方向的沂源市(YY),平均霾日分别达到 53.9、35.9 d/a 和 48 d/a,远远超过其它中小城市。霾日这种大值区沿西南—东北方向分布的现象可能与西南气流的输送有关。在冬季空气干燥,华北地区少雨,加上冷空气活动较弱,使华北地区容易出现西南风,空气中的气溶胶粒子随西南气流向东北方向输送。这个结论与王自发等^[3]用数值模式对 2013 年 1 月的重霾污染事件进行模拟的结果一致,即对典型台站而言(例如北京、天津),来自京津冀外区域的污染物跨城市群输送的影响非常显著。

北京市周边的地形特点也是污染的原因之一(图 3),北京位于山西省的东北方向,地处西南气流的引导下,山西的污染物易向北京飘移;此外,北京的西部为太行山脉、北部和东北部为燕山山脉,这些污染物受山脉的阻挡,容易堆积,造成北京市的污染。

2.1.2 冬季各月总霾日的空间分布特征

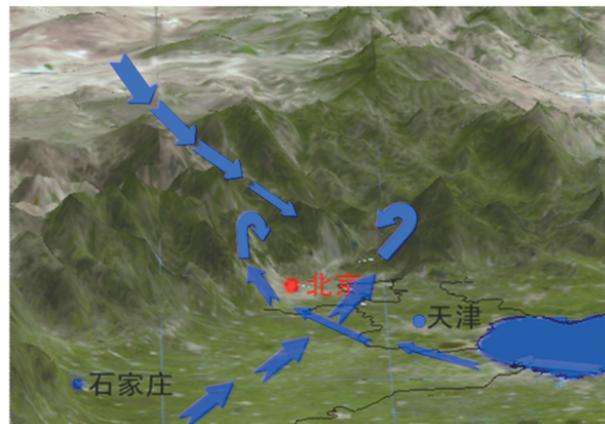


图3 北京市周边地形特点
(蓝色箭头代表常年盛行的风向)

图 2b~2d 为 1961—2011 年 12 月、1 月、2 月逐月年平均霾日的空间分布。12 月、1 月、2 月总霾日的空间分布与图 2a 相似,12 月(图 2b)保定、天津和济南仍分别位于整个华北霾日的前 3 位(26.88 d/a、26.49 d/a 和 24.82 d/a);1 月(图 2c)略有些变化,霾日前三位分别为保定(26.82 d/a)、天津(26.22 d/a)和太原(24.88 d/a);2 月(图 2d)霾日前三位分别为

天津(23.43 d/a)、保定(22.8 d/a)、济南(22.02 d/a)。

2.2 华北地区冬季霾日的时间分布特征

2.2.1 华北地区各省平均冬季霾日的时间分布特征

图4a为内蒙古自治区1961—2011年区域平均冬季霾日的年代际变化。从图中可以看出,自1961—1980年,内蒙全区的平均霾日呈上升趋势(增长率为2.85 d/10a, $R^2=0.805$ 通过0.01的显著性检验,以下同),在此期间最少霾日出现在1962年,为10 d,最多霾日出现在1980年,为24 d。1980年之后,霾日呈明显下降趋势(下降率4.97 d/10 a),2010年全区平均霾日仅为2.5 d。这个结论与吴兑等^[7]的研究结论相同,内蒙古1980年之前霾日的增加可能与沙尘暴和浮尘有关,但1980年以后,由于内蒙古的经济欠发达,经济规模和工业水平相对滞后,形成霾的污染物排放较少。

河北省的冬季平均霾日(图4b)从1961—1990年呈明显上升趋势(7.86 d/10 a),除了1962年和1967年外,平均霾日均超过20 d,1986年霾日出现最多,为47.2 d,1967年最少,但也达到了17.9 d。1990年之后,河北省平均霾日出现了下降的趋势(-4.64 d/10 a),但平均仍在25 d以上,2000年霾日出现得最多,为46.1 d,2003年最少,为25.8 d。

山东省的霾日变化与河北省类似,从1961—1990年呈迅速上升趋势(15.62 d/10 a),最少出现在1969年,为13.4 d,最多出现在1990年,为55.7 d。1990年后,山东省的霾日逐渐减少(-7.44 d/10 a),从1991年的56 d逐渐减少到2008年的34.6 d,但2009年和2011年霾日又有小幅上扬,分别为45.6 d和51.3 d。

河北省和山东省1967—1969年霾日的减少是因为当时工业生产处于混乱状态,1970年之后,经济得到恢复,霾日也逐渐增多,可以看出经济活动对霾日的影响。从1990年之后霾日明显减少,与国家的产业结构调整有关,这个结论与吴兑等^[7]的研究结论相同。

1967年山西省的平均霾日出现最低值(6.5 d),这点与华北地区其它省份相同,但1961—2011年整体呈增长趋势(4.75 d/10 a),特别是1967年开始至80年代末,呈明显增长趋势(7.86 d/10 a),90年代初期略有减少,但从90年代中期再次增加,最多出现在2004年,为44.1 d。这说明山西省主要的工业是产煤,产业结构并没有很大变化,因此霾日呈持续增长趋势。

2.2.2 华北地区主要大城市冬季霾年代际变化特征

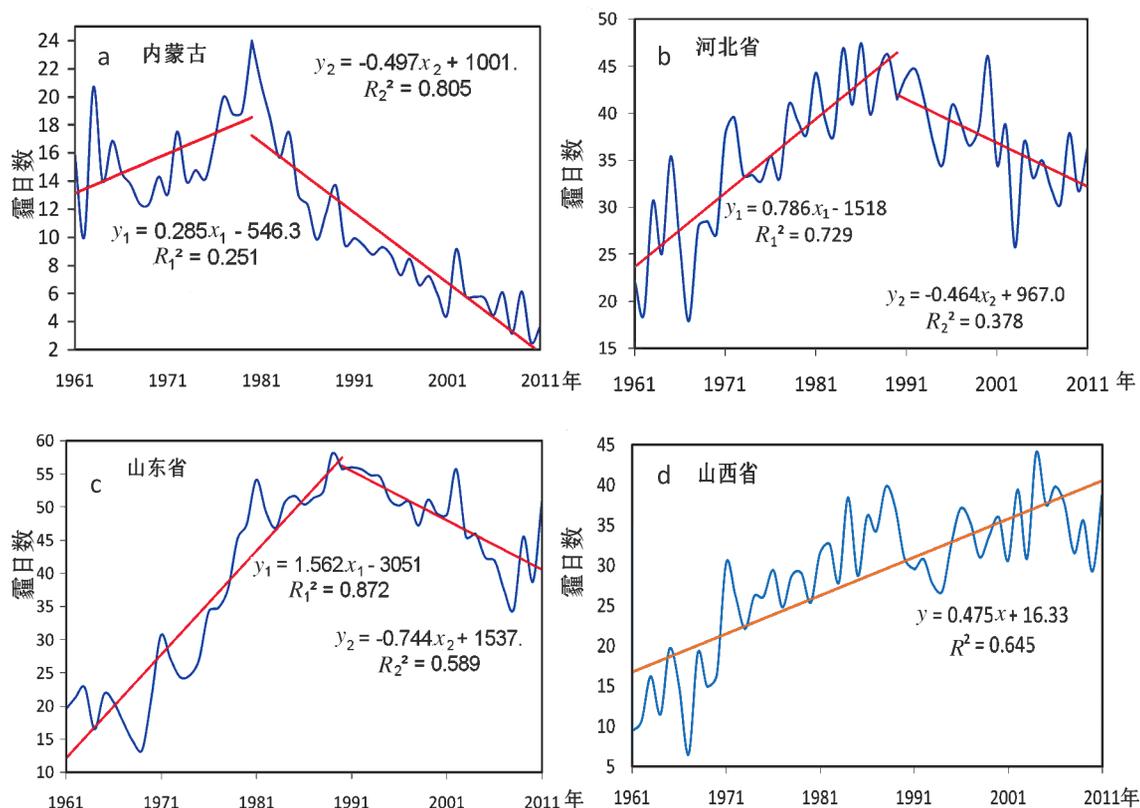


图4 华北各省平均霾日的年代际变化曲线(直线为线性趋势线)

从图2可以看到,霾日的多少和城市人口及城市工业颗粒物的排放量有密切关系,因此本文对华北主要大城市北京、天津和各省会城市冬季霾日的年代际变化(图5)逐一分析。图5上y指1961—2011年总的趋势变化,用黑色实线表示,y₁和y₂分别指前期和后期变化趋势,用虚线表示。

虽然近51 a冬季北京的霾日(图5a)1961—2011年略有下降趋势(-0.21 d/10 a),但分开来看,霾日仍然有很大变化。60年代初期至中期,霾日呈明显下降趋势,最低出现在1967年,为18 d。但20世纪60年代后期至70年代中期,北京的霾日呈明显上升趋势(25.64 d/10 a),最高出现在1976年,为

82 d。从70年代中后期至2000年,霾日先逐渐下降后略有上扬,最低出现在1995年,为55 d,从2000—2011年又明显下降(-26.85 d/10 a),北京地区冬季霾日数的减少与冬季供暖由燃煤改为燃气密不可分,另外也与2008年奥运会前后对污染物的治理使天气状况转好有关。

虽然天津(图5b)整体上呈下降趋势(-0.49 d/10 a),但1961—1990年却呈增加趋势(6.66 d/10 a),1967年和1977年分别出现一个霾日低值,1990—1995年霾日明显减弱(54 d/10 a, R²=0.869),这种减少可能与90年代初期天津市的产业结构调整有关。1995年之后,天津霾日持续增长,速率为12.27 d/10 a。

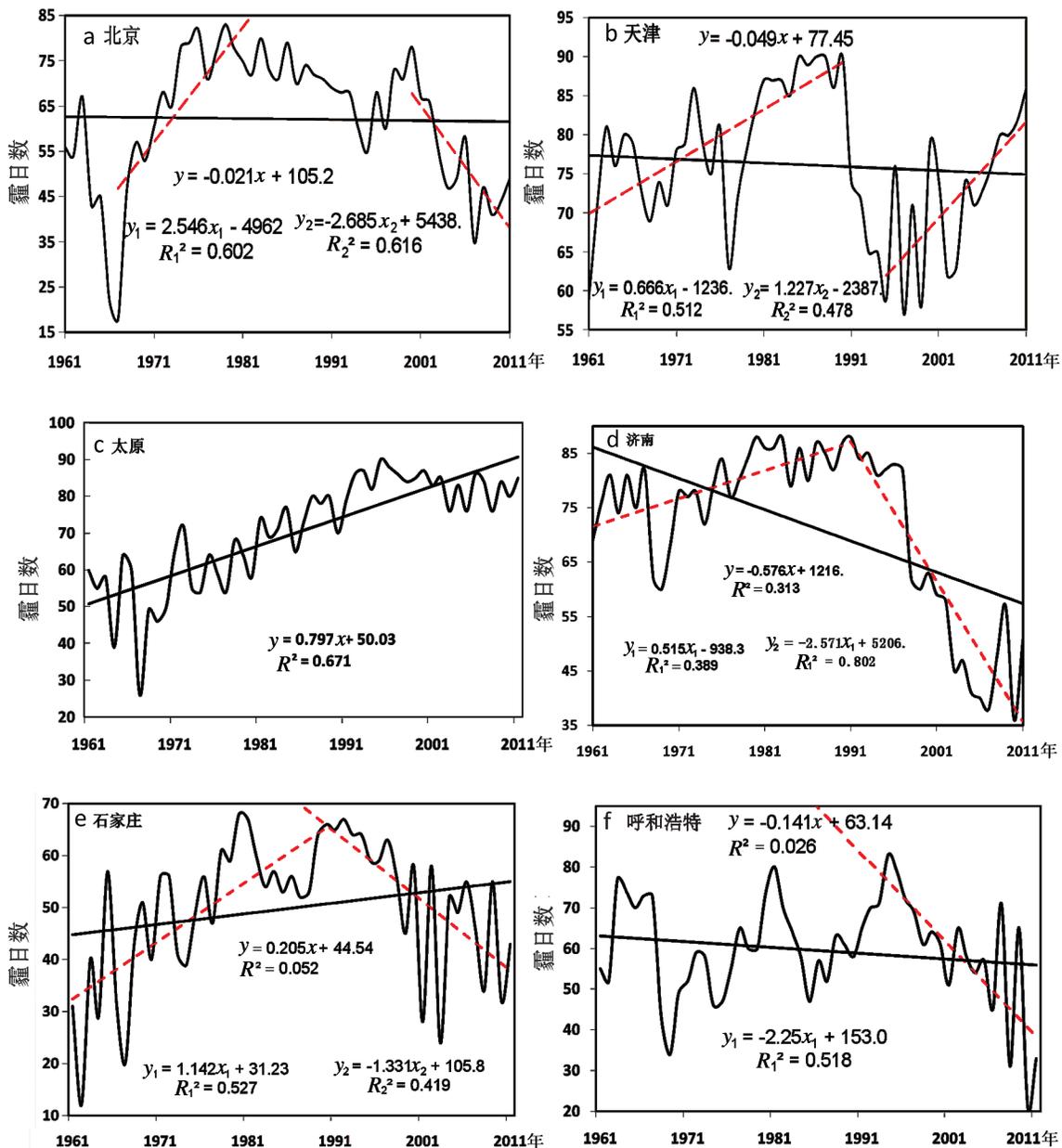


图5 华北主要大城市冬季平均霾日的年际变化曲线
(实线为1961—2011年的线性趋势线,虚线为不同时期的线性趋势线)

太原(图 5c)51 a 来霾日一直持续增长,且增长较明显(7.97 d/10 a, $R^2=0.671$),与图 4d 整个山西省的霾日变化趋势相同。济南(图 5d)虽然自 1961—2011 年呈下降趋势,其中,1961—1991 年呈增长趋势(5.21 d/10 a),1991—2011 年呈快速减小趋势(-25.39 d/10 a, $R^2=0.819$),特别是 90 年代末,减少出现趋势最明显,这可能和济南观测站的迁址有关系,从污染较严重的北部迁到污染较轻的南部地区。石家庄(图 5e)整体上增长趋势(2.05 d/10 a),其中 1961—1991 年呈快速增长趋势(11.42 d/10 a),1991 年之后呈快速下降趋势(-13.31 d/10 a)。

呼和浩特(图 5f)从 1961—2011 年霾日呈现略增加的趋势(2.05 d/10 a),但期间出现 3 个峰值:从 1962 年的 52 d 突然增加到 1963 年的 77 d,但从 1963 年开始至 1966 年逐渐减弱至 34 d,从 1966 年开始又逐步增加,1981 年增至 81 d,此后又再次减弱到 47 d (1985 年),从 1985 年再次逐渐增加,到 1994 年增加至 84 d,自 1994 年又迅速减少(-23.63 d/10 a)。

2.2.3 华北主要大城市冬季各月霾日的时间分布特征

图 6 为华北地区主要大城市冬季各月的平均霾日分布图。北京、天津、太原和济南 12 月平均霾日数略大于 1 月,2 月略小于 1 月,在整个冬季中最少;石家庄和呼和浩特 1 月平均霾日数略大于 12 月,与上面 3 个城市相比,2 月与 1 月的差距较明显。但几个城市冬季平均霾日数最多的月份为 12 月和 1 月,与以前的研究结论相同^[7]。

北京 12 月霾日(图 7a1)51 a 来略有下降,速率为-0.27 d/10 a,但 1 月(图 7b1)和 2 月(图 7c1)的总趋势基本不变。在 90 年代初期,1 月(图 6b1)和 2 月(图 7c1)的霾日出现低值。

天津 12 月的霾日(图 7a2)下降趋势比 1 月(图 7b2)明显,分别为-0.4 d/10 a 和-0.1 d/10 a。60 年代

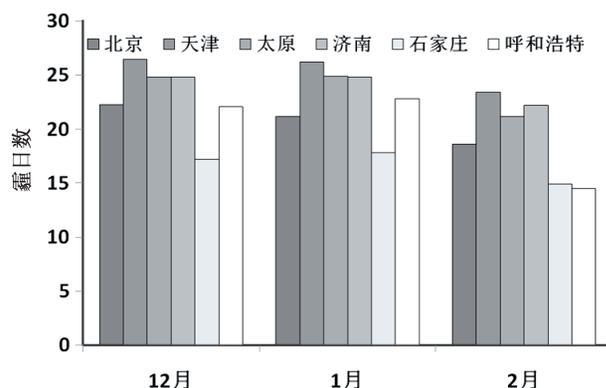


图 6 华北主要大城市 51 a 冬季各月平均霾日的分布

末,12 月出现明显低值,但 1 月和 2 月低值不明显。

太原 2 月(图 7c3)的霾日增长趋势大于 1 月(图 6b3)和 12 月(图 7a3),分别为 2.58 d/10 a、2.522 d/10 a 和 2.81 d/10 a,从 90 年代中后期开始,12 月(图 7a3)的霾日数略有下降,但 1 月(图 7b3)和 2 月份的下降趋势不明显(图 7a3)。

济南 1 月霾日(图 7b4)降低趋势最明显,为-2.54 d/10 a,其次为 12 月(-1.88 d/10 a,图 7a4),最不明显的为 2 月(-1.24 d/10 a,图 7c4)。2000 年迁址之后,济南的霾日出现明显减弱,冬季 3 个月均出现这种情况,但在 2010 年 12 月和 2011 年 1 月,济南霾日比前一年明显增加,2 月的霾日则比前一年明显减少。

石家庄 12 月(图 7a5)和 1 月(图 7b5)霾日略有增加的趋势,分别为 0.95 d/10 a、0.98 d/10 a,2 月的霾日(图 7c5)a 值为 0.11 d/10 a。呼和浩特霾日略有下降,12 月、1 月和 2 月的下降趋势分别为-0.66 d/10 a、-0.2 d/10 a 和-0.54 d/10 a。

3 结论与讨论

使用 1961—2011 年华北地区 50 个站冬季及逐月不同级别的霾日资料,运用统计学方法,对华北地区霾日的时空分布特征进行了分析,结果发现:

(1)华北地区霾日大值区呈西南—东北向的特点,来自京津冀外区域的污染物跨城市群输送的影响非常显著。从各省平均霾日的时间演变特征来看,仅山西省一直呈增长趋势,增长率为 4.75 d/10 a,特别是 1967 年至 80 年代末,明显增长趋势(7.86 d/10 a)。其他各省均在不同时段有上升和下降趋势,其中山东增加和减少率最为显著,1961—1990 年平均霾日的增长率为 15.62 d/10 a,1990 年之后减少率为-7.44 d/10 a。内蒙古的增加和减少率均是最小的,1961—1980 年内蒙古的增长率为 2.85 d/10 a,1980 年之后下降率为 4.97 d/10 a。

(2)从各省级以上大城市的霾变化特点上发现,太原、石家庄和呼和浩特均呈一致的增加趋势,其中太原的增加趋势最显著为 7.97 d/10 a。其他城市均存在两个变化阶段,前期霾增加,后期霾减少。其中北京市的上升和下降趋势最为显著。60 年代后期至 70 年代中期,呈明显上升趋势(25.64 d/10 a),2000—2011 年明显下降(-26.85 d/10 a)。各大城市冬季平均霾日数最多的月份为 12 月和 1 月。从逐月霾日的年际变化来看,太原冬季 3 个月霾日均呈增长趋势,而济南呈一致减小趋势。

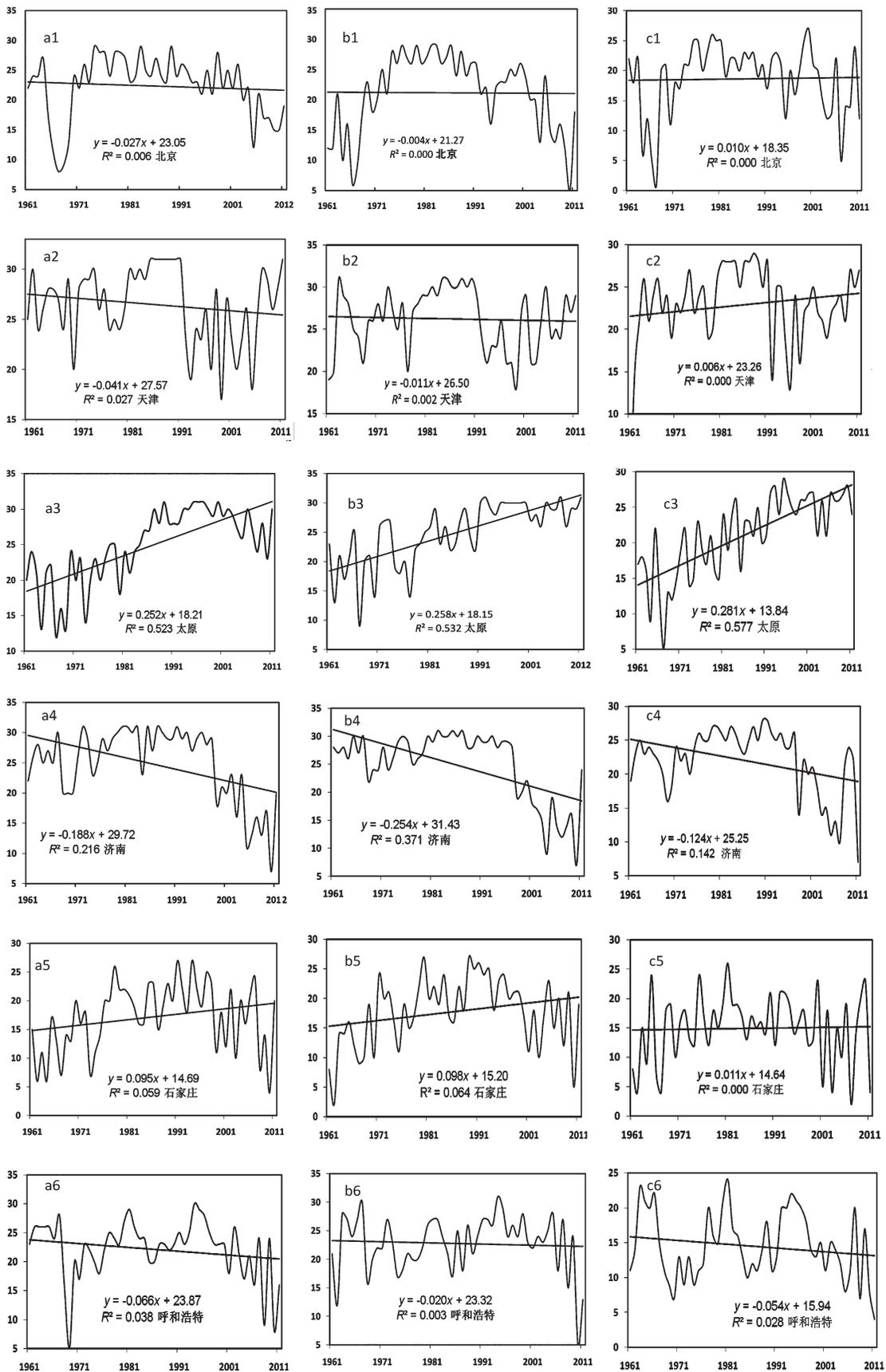


图7 华北主要大城市各月霾日的冬季各月年代际变化曲线
(a1~a6分别为12月,b1~b6为1月,c1~c6为2月,直线为对应的线性趋势)

参考文献:

- [1] 吴兑.再论都市霾与雾的区别[J].气象,2006,32(4):9-15.
- [2] 穆穆,张人禾.应对雾霾天气:气象科学与技术大有可为[J].中国科学:地球科学,2014(57):1-2.
- [3] 王自发,李杰,王哲,等.2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J].中国科学:地球科学,2014(57):3-13.
- [4] 王跃思,姚利,王莉莉,等.2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J].中国科学:地球科学,2014(57):4-25.
- [5] 张人禾,李强,张若男.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的天气气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014(57):26-35.
- [6] 吴兑.近十年中国霾天气研究综述[J].环境科学学报,2012,32(2):256-269.
- [7] 高歌.1961—2005年中国霾日气候特征及变化分析[J].地理学报,2008,6(7):761-768.
- [8] 宋连春,高荣,李莹,等.1901—2012年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J].气候变化研究进展,2013,9(5):313-318.
- [9] 胡亚旦,周自江.中国霾天气的气候特征分析[J].气象,2009,35(7):73-78.
- [10] 史军,崔林丽,贺千山,等.华东雾和霾日数的变化特征及因果分析[J].地理学报,2010,65(5):533-542.
- [11] 刘蔚琴,杜尧东.三种方法统计的广东省霾日时空变化特征比较分析[J].气象与环境科学,2015,38(2):42-47.
- [12] 赵金霞,沈岳峰,范苏丹.天津市滨海新区持续性重度雾霾成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):69-74.
- [13] 黄家敏,陈星宇,安静宇,等.霾期间上海低层气溶胶微物理属性与地面相对湿度分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(1):39-44.
- [14] 孙彧,马振峰,牛涛,等.最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J].气候与环境研究,2013,18(3):297-406.
- [15] 赵普生,徐晓峰,孟伟,等.京津冀区域霾天气特征[J].中国环境科学,2012,32(1):31-36.
- [16] 王楠,杨洪儒,梁艳.近37a乌鲁木齐机场雾的不均匀性特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(4):43-49.
- [17] 王开燕,邓雪娇,李海洋,等.不同天气状况下气溶胶散射系数变化特征分析[J].气象与环境科学,2014,37(1):29-32.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1979:22-27.

Characteristics of Temporal and Spatial Distribution of Haze in North China

ZHUO Hong¹, ZHANG Wei¹, YUAN Mingfan¹, WANG Ji^{2*}

(1. The Meteorological Center of North China Air Traffic Administration, Beijing 100621, China;

2. Beijing Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract Based on the data of haze days in winter and monthly haze days in December, January, and February which collected at 50 stations in north China for the period from 1961 to 2011, the temporal and spatial distribution characteristics of different levels of haze days in north China has been studied. Results suggest that: the distribution of the haze is very uneven, greater value mostly occurs in industrial city, highly developed cities and coal base, turbidity island phenomenon is obvious, the high value of hazy days distribute from the southwest to the northeast, it is very significantly that influence of the pollutants across from the outside area of Beijing-Tianjin-Hebei. The study also shows that the average haze days have been on the rise except in Shanxi, haze days have been on the decline in other regions in recent years. From the change characteristics of each big city, the average haze days of Taiyuan, Shijiazhuang and Hohhot show a consistent growth trend, while Jinan, Beijing and Tianjin shows a downward trend. The haze days of winter are most concentrated in big cities in December and January.

Key words hazy days; north China; temporal and spatial distribution; haze grade