

文章编号: 1007-7588(2014)01-0191-09

京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析

周兆媛^{1,2}, 张时煌¹, 高庆先³, 李文杰^{1,2}, 赵凌美^{1,2}, 冯永恒^{1,2},
徐明洁^{1,2}, 施蕾蕾^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 空气质量与人们的健康和生活息息相关。除了直接受局地大气污染物排放影响, 空气质量也受局地气象要素的影响。本文利用相关分析法和主成分回归分析法详细阐述了2001–2010年北京、天津和石家庄的空气污染指数(API)与各气象要素的关系, 并假设大气污染物排放相对稳定, 结合高分辨率区域气候模式模拟结果, 探讨未来各气象要素的可能变化及其对京津冀地区空气质量的潜在影响。结果表明: ①气压、气温、降水量和相对湿度与3个城市空气质量的关系较为密切。其中, 气压与API指数存在显著的正相关关系, 其他气象要素与API指数存在显著的负相关关系; ②未来京津冀地区的海平面气压和气温均呈上升趋势, 风速呈减弱趋势。降水量在2020s呈下降趋势, 而后上升, 总体呈上升趋势。相对湿度在2020s和2050s呈下降趋势, 而后上升, 总体呈上升趋势; ③SRES A1B排放情景下, 未来气候变化对京津冀地区空气质量的改善有一定的促进作用。北京的API指数变化幅度远大于天津和石家庄, 3个城市在不同时段的API指数变化峰值均出现在6月份。

关键词: 京津冀; 气候变化; 空气质量; 空气污染指数; 气象要素

1 引言

空气质量与人们的健康和生活息息相关。环境空气质量除了直接受局地大气污染物排放影响, 也受局地气象要素及气候变化的影响^[1]。有研究表明^[2,3], 在污染源排放相对稳定的条件下, 气象条件对空气质量状况起主导作用。研究空气质量与气象要素的关系, 并将其与气候变化结合起来, 探讨未来各气象要素变化对空气质量的潜在影响, 对我国减污治污政策的制定具有一定的指导意义。

京津冀地区属于我国五大城市群之一, 经济实力雄厚, 在社会经济发展中扮演着重要的角色。近年来随着经济的快速发展和城市化进程的加快, 该地区空气质量问题受到人们的普遍关注。隋珂珂等^[4]研究发现北京近几年秋季PM₁₀持续污染有加重趋势; 周涛等^[5]分析了北京市雾霾天气的成因, 发现

主要受到PM_{2.5}和PM₁₀增加的影响; 张国文等^[6]分析了北京市2007–2011年的大气PM_{2.5}质量浓度, 发现北京市春季和冬季的PM_{2.5}质量浓度高于夏季和秋季, 其主要受气象条件和燃煤取暖的影响。此外, 也有一些关于京津冀地区空气质量与气象要素关系的研究。徐晓峰等^[7]对北京一次持续重污染过程进行了分析, 发现低风速, 大气层结稳定, 逆温等不利于污染物扩散的气象条件对其影响很大; 刘彩霞等^[8]分析了天津市采暖期间气象因子与空气质量的相关关系, 发现地面风场对空气质量的影响具有双重性, 大气稳定度的日变化影响空气质量的日变化; 李国翠等^[9]对石家庄市污染日特征及其天气背景进行了分析, 发现污染日分为沙尘和非沙尘两类, 气象要素特征前者表现为风速大、湿度小、多正变压等锋后特征, 后者刚好相反; 李文杰等^[10]利用统

收稿日期: 2013-06-27; 修订日期: 2013-11-04

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项(编号: 201109065)。

作者简介: 周兆媛, 女, 山东胶州人, 硕士生, 主要研究方向为生态信息, 大气环境。E-mail: 295474140@qq.com

通讯作者: 张时煌, E-mail: zhangsh@igsnrr.ac.cn

计分析法研究了京津石3市空气污染指数与气象要素的相关关系,发现气象要素对空气污染的影响存在较大的时空差异性。

上述研究仅针对京津冀地区的空气质量及气象要素与空气质量的关系,而气候变化情况下,各气象要素的变化对空气质量的潜在影响的研究成果还很少见。本文选取北京、天津和石家庄作为京津冀地区的代表城市,利用3个城市2001–2010年的空气污染指数(API)数据和相应时段的气象要素地面观测数据,经相关分析和主成分回归分析,详细阐述API指数与各气象要素的关系,并假设大气污染物排放相对稳定,结合高分辨率区域气候模式模拟结果,探讨未来各气象要素的可能变化及其对该地区空气质量的潜在影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

(1)空气污染指数(API)资料来源于中华人民共和国环境保护部网站重点城市空气质量日报数据,包括北京、天津和石家庄2001年1月1日–2010年12月1日的逐日API、首要污染物、空气质量级别和空气质量状况。API是将常规监测的几种空气污染物(包括SO₂、NO₂和PM₁₀,京津冀地区2012年才开始将PM_{2.5}纳入环境空气质量标准)的浓度简化成为单一的概念性指数值形式,并分级表征空气污染程度和空气质量状况。环境保护部2008年发布并实施的《城市空气质量日报和预报技术规定》将API指数分为五级,分级标准见表1^[13]。

(2)气象要素资料分别取自中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料日值数据集和月值数据集。其中,气压、气温、风速、最大风速的风向、相对湿度资料来自日值数据集,降水量资料来自月值数据集。

(3)区域气候模式预估数据来源于国家气候中心,是用25km高水平分辨率区域气候模式

(RegCM3)嵌套MIROC3.2-hires全球气候模式模拟得到的SRES A1B排放情景下(SRES A1B情景是一个中等排放情景,至2100年的CO₂浓度值约为700mL/m³)2001–2100年中国区域各气象要素的月均值。吴佳等^[11]对模式的试验设计和所用资料进行了详细的介绍,高学杰等^[12]经检验证明模式对当代气候有较好的模拟能力。该数据集包含的气候要素有:海平面气压,气温,降水量,风速,相对湿度。

2.2 研究方法

本文首先对北京、天津和石家庄的API指数和对应的气象要素数据进行月平均处理,在此基础上进行相关分析和主成分回归分析,研究京津冀地区空气质量与气象要素的关系。其次,利用区域气候模式模拟得到的中国区域2001–2100年各气象要素的月平均资料,借助ArcGIS软件的空间分析工具,计算出京津冀地区各气象要素的年际变化量及各时段(2020s、2050s和2090s)的月均值相对于2001–2010年的变化量。最后,将二者结合起来,探讨未来京津冀地区各气象要素变化对空气质量的潜在影响。

3 结果与分析

3.1 2001–2010年京津冀地区的空气质量状况

2001–2010年,北京、天津和石家庄的有效样本均为3 618天;空气质量优良率分别为65.8%,78.7%和70.3%,逐月的空气质量优良率统计见图1。从图1可以看出,3个城市空气质量最好的时段均为7–9月份,但空气质量最差的时段有所不同,北京为3月份、4月份,天津和石家庄均为1月份和12月份。

在研究的时段中NO₂没有作为首要污染物出现过,影响3个城市空气质量的主要污染物为PM₁₀和SO₂。北京有3046天的首要污染物为PM₁₀,占84.2%,有228天的首要污染物为SO₂,占6.3%,其余344天空气质量为优,占9.5%;天津PM₁₀为首要污染物的天数为2 711天,占74.9%,SO₂为首要污染物的

表1 空气污染指数范围及相应空气质量级别

Table 1 Air pollution index range and air quality levels

API 指数	0–50	51–100	101–150	151–200	201–250	251–300	>300
空气质量级别	I	II	III 1	III 2	IV 1	IV 2	V
空气质量状况	优	良	轻微污染	轻度污染	中度污染	中度重污染	重污染

注:引自文献[13]。

2014年1月

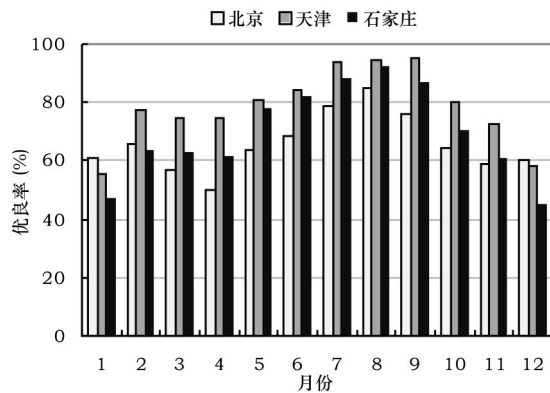


图1 2001-2010年北京、天津、石家庄逐月空气质量优良率统计

Fig.1 The monthly statistics of rates of good air quality in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang from 2001 to 2010

天数为674天,占18.6%,其余233天空气质量为优,占6.5%;石家庄有3037天的首要污染物为 PM_{10} ,占83.9%,有391天的首要污染物为 SO_2 ,占10.8%,其余190天空气质量为优,占5.3%。可见, PM_{10} 是造成京津冀地区大气污染的主要因素。

此外,本文统计了近10年来北京、天津、石家庄的持续污染($API \geq 101$,持续时间 ≥ 3 天)发现,北京的持续污染总次数为164次,共725天;天津的持续污染总次数为90次,累计412天;石家庄的持续污染总次数为130次,共745天。其中,北京春季持续污染天数所占的比例最大,为34.5%,而天津和石家庄冬季持续污染天数占的比例最大,分别为47.8%和45.8%。结合同期天气现象日历资料与气象要素

的分析发现,北京春季的持续污染受沙尘天气的影响较大,沙尘天气天数占持续污染天数的22.8%,而天津和石家庄分别为10.4%和3.4%。

3.2 京津冀地区空气质量与气象要素的关系

3.2.1 京津冀地区空气污染指数与气象要素的相关性分析 气象要素是制约污染物在大气中稀释、扩散、迁移和转化的重要因素^[14]。本文利用北京、天津和石家庄2001-2010年的空气污染指数(API)日报数据和相应时段的各气象要素地面观测数据,采用相关统计法分析逐月各气象要素平均值与逐月平均API之间的相关关系,结果见表2。

从表2可以看出,各气象要素对北京、天津、石家庄空气质量的影响程度存在一定的差异。气压、气温、降水量和相对湿度与3个城市空气质量的关系较为密切,其中,气压与API指数存在显著的正相关关系,其他气象要素与API指数存在显著的负相关关系。

(1)气压与API的关系。北京、天津和石家庄的本站气压与API指数月变化呈显著正相关关系,表明气压对京津冀地区空气质量有显著的负效应作用。大气污染物的扩散与大范围的天气背景有关。当低压控制时,大气处于中性或不稳定状态,低层空气辐合上升,近地面的污染物随空气上升到高空,有利于近地面污染物向高空扩散和雨水稀释;当高压控制时,空气作下沉运动,并常形成下沉逆温,阻止污染物的向上扩散。如果高压移动缓慢,长期停留在某一地区,就会造成由于高压控制

表2 2001-2010年逐月API与气象要素相关系数

Table 2 The monthly correlation coefficients between API and meteorological factors from 2001 to 2010

		气压 (hPa)	平均风速 (m/s)	平均气温 (℃)	降水量 (mm)	相对湿度 (%)
北京	逐月相关系数	0.183*	0.381**	-0.266**	-0.431**	-0.359**
	显著性水平(双尾)	0.046	0.000	0.003	0.000	0.000
	N	119	119	119	119	119
天津	逐月相关系数	0.383**	-0.050	-0.470**	-0.372**	-0.258**
	显著性水平(双尾)	0.000	0.591	0.000	0.000	0.005
	N	119	119	119	119	119
石家庄	逐月相关系数	0.404**	0.075	-0.471**	-0.407**	-0.087
	显著性水平(双尾)	0.000	0.420	0.000	0.000	0.345
	N	119	119	119	119	119

注:“*、**”分别代表通过了0.05、0.01置信度检验;N代表参与相关分析的月份个数;北京、天津、石家庄2010年12月份只有1天的API数据,因此该月份未参与相关分析。

伴随而来的小风速和稳定层结,不利于污染物的稀释和扩散^[15,16]。尤其是高压天气晴朗时,夜间容易形成辐射逆温,对污染物的扩散更不利,此时易出现污染危害^[17,17]。如果再加上不利地形条件,往往形成严重的污染事件。陈朝晖等^[18]分析北京地区一次重污染过程的大尺度天气型,发现PM₁₀质量浓度在上升、达到峰值和下降阶段对应的天气形势分别为持续数日的大陆高压均压场、相继出现的低压均压区及锋后的高气压梯度场,其中持续存在的大陆高压均压场是造成重污染浓度累积的主要背景场。

(2)气温与API的关系。API指数月变化与北京、天津和石家庄的气温月变化存在显著的负相关关系,说明气温对京津冀地区空气质量有显著的正效应作用。其原因在于,大气污染物在垂直方向的扩散主要取决于气温的垂直分布^[17,19],当气温较高时,大气处于不稳定状态,在热力对流的作用下污染物向上扩散,API指数就降低;反之,大气变得稳定,污染物的扩散受到抑制,API指数就升高。

(3)降水量与API的关系。北京、天津和石家庄的降水量与API指数月变化呈显著负相关关系,说明降水量对京津冀地区空气质量有显著的正效应作用。由本文对京津冀地区空气质量状况分析可知,PM₁₀是该地区首要的空气污染物。研究表明^[20],大气降水不仅可以冲刷空气中的部分PM₁₀颗粒,也可以在一定程度上抑制地面扬尘发生,从而有效减少PM₁₀排放。因此,降水对京津冀地区污染物有较好的净化作用。

(4)风与API的关系。风是边界层内影响污染物稀释扩散的重要因子,风速是造成快速水平输送或平流的主要原因,而风向则决定大气污染物浓度的分布^[21]。风速对污染物的环境浓度具有双重影响,在一定范围内,风速越大越有利于空气污染物的扩散和稀释,API指数越小;超过这一范围,风速增大将使空气中可吸入颗粒物浓度明显增加,导致空气污染加重^[6,8]。本文按风速等级由低到高的顺序逐步分析了近10年API指数与风速的相关关系发现,北京和石家庄的风力临界值为4级,即风力小于4级时,二者呈负相关,当风力大于4级时,二者呈正相关;天津的风力临界值为5级。这是因为风速小于风力临界值时,风速越大,越有利于大气污

染物的稀释和扩散,API指数越小;而风速大于风力临界值时,大气中可吸入颗粒物浓度开始受地面开放源的影响,导致空气污染加重。此外,风向对空气质量的影响也具有双重性。

本文统计了2001–2010年北京、天津和石家庄不同风向(最大风速的风向)的总日数和污染日数,结果见图2。其中,北京西南风向的日数和污染日数最多,天津为西北风向,石家庄为东南风向。由此可见,影响3个城市空气质量的风向各不相同。

北京的风速与API指数月变化呈显著正相关关系,而天津和石家庄的风速与API指数间的相关性不显著。北京春、夏、秋3个季节的主导风向为西南风和南风,而北京的西部和北部为山脉,污染物在风的输送作用下在山前的平原地区汇聚,污染物浓度提高^[17]。北京的3–4月份沙尘天气多发,平均风速达到一年中的最大值,API指数也达到最大。冬季,北京的主导风向为西北风,且受寒潮影响,风速较大,但受地形限制,大风不足以将燃煤取暖排放的大量PM₁₀携带扩散出去。因此,平均风速和API指数在冬季出现了继春季以后的又一个高峰。天津和石家庄的风速月变化趋势与API指数月变化趋势存在较大差异,且冬季的差异最大。两个城市的平均风速均在春季的3–4月份达到最大,受沙尘天气影响,此时的API指数也较高;冬季,天津和石家庄的平均风速处于一年中的最低水平,不利于大气污染物的扩散,加之冬季采暖加强了污染物源排

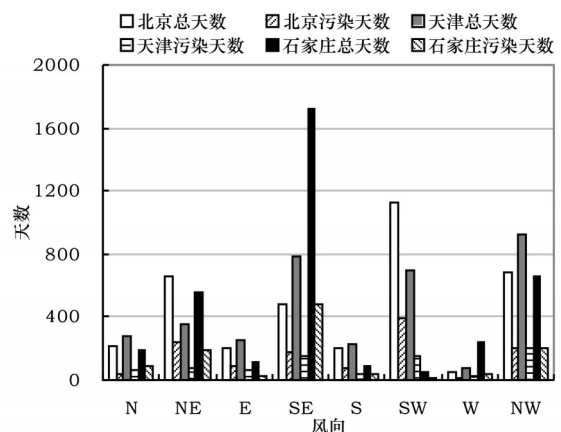


图2 2001–2010年北京、天津、石家庄不同风向对应的总日数和污染日数

Fig.2 The total days and pollution days in different wind directions in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang from 2001 to 2010

2014年1月

放,使得API指数达到了一年中的最大值。

(5)相对湿度与API的关系。北京、天津和石家庄的相对湿度与API指数月变化为显著负相关关系,说明相对湿度对京津冀地区的空气质量有显著正效应作用。京津冀地区夏季空气中水汽较多,相对湿度和降水量均达到一年中的最大值,此时的API指数降至一年中最低;冬季和春季的相对湿度较小,降水量也较少,同时受到冬季取暖和春季沙尘天气的影响,该时段的API指数值上升。综上,京津冀地区的API指数值随相对湿度的季节变化而变化,具有较高的相关性。

3.2.2 京津冀地区空气污染指数与气象要素的主成分回归分析 主成分分析方法是一种将多个指标化为少数几个不相关的综合指标(即所谓主成分)的统计分析方法。它对于分析多指标的大量数据以了解数据间的关系及趋势是一种很有效的方法,因此,主成分分析被广泛用于分析大量的环境和空气污染数据研究中^[22,23]。由于选取的气温、气压、风速、降水量和相对湿度5个常规气象要素之间存在较高的相关性(如气温和气压之间的相关系数可达-0.944),需要先对其进行主成分分析,经SPSS软件计算得相关系数矩阵的特征值及贡献率见表3。北京、天津和石家庄各气象要素的前两个主成分的累计贡献率已超过85%,即可提取原指标85%以上的信息,所以均选取第一和第二两个主成分即可。用表4中列出的特征向量值,即可对选取的两个主成分进行解释。

北京的第一主成分反映的是气温指标,第二主成分为风速指标;天津的第一主成分是气温和降水量的综合,第二主成分为风速和相对湿度的综合;

石家庄的第一主成分是气温、气压和降水量的综合,第二主成分为风速和相对湿度的综合。表明气温、气压、风速、降水量和相对湿度对京津冀地区空气质量的影响都比较大。

新构造的气象要素主成分彼此间相互独立,不存在共线性,而且代表了原指标绝大部分信息,可进行进一步的多元线性回归分析。以第一主成分值 Z_1 和第二主成分值 Z_2 为自变量,以标准化的API指数 y' 为因变量,进行多元线性回归,利用最小二乘法估算参数,得到标准化主成分回归方程为:

$$y'_{\text{北京}} = -0.220Z_1 + 0.223Z_2 \quad (1)$$

$$y'_{\text{天津}} = -0.237Z_1 - 0.156Z_2 \quad (2)$$

$$y'_{\text{石家庄}} = -0.262Z_1 + 0.084Z_2 \quad (3)$$

式中 y' 为标准化的API指数; Z_1 为第一主成分; Z_2 为第二主成分。

经计算,3个回归方程的 F 检验显著性概率 $P=0.000<0.05$,说明回归效果较好。对各系数进行 t 检验,显著性概率 P 值均小于0.05,说明各主成分对因变量 y' 的影响作用都很显著。将各主成分的线性表达式分别代入3个回归方程,并转换为一般线性回归方程,即:

$$y_{\text{北京}} = -0.115x_1 + 0.033x_2 + 12.179x_3 - 0.053x_4 - 0.352x_5 + 59.411 \quad R^2 = 0.213 \quad (4)$$

$$y_{\text{天津}} = -0.301x_1 + 0.401x_2 - 1.664x_3 - 0.051x_4 - 0.036x_5 - 309.252 \quad R^2 = 0.204 \quad (5)$$

$$y_{\text{石家庄}} = -0.463x_1 + 0.559x_2 - 2.656x_3 - 0.071x_4 - 0.155x_5 - 442.369 \quad R^2 = 0.199 \quad (6)$$

式中 y 为API指数; $x_1 \sim x_5$ 分别为气温、气压、风速、降水量、相对湿度。

表3 相关系数矩阵特征值及贡献率

Table 3 The eigenvalues and contribute rates

	主成分	特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
北京	1	3.123	62.463	62.463
	2	1.254	25.087	87.551
天津	1	3.008	60.165	60.165
	2	1.461	29.212	89.377
石家庄	1	2.736	54.717	54.717
	2	1.636	32.719	87.436

表4 特征值对应的特征向量

Table 4 The corresponding eigenvectors of eigenvalues

	主成分	气温 (x_1)	气压 (x_2)	风速 (x_3)	降水量 (x_4)	相对湿度 (x_5)
北京	1	0.516	-0.484	-0.218	0.492	0.458
	2	0.262	-0.419	0.778	0.021	-0.389
天津	1	0.515	-0.487	-0.258	0.507	0.416
	2	0.287	-0.409	0.696	0.087	-0.508
石家庄	1	0.539	-0.514	-0.106	0.521	0.404
	2	-0.278	0.372	-0.715	0.115	0.511

3.3 京津冀地区未来各气象要素变化及其对空气质量的潜在影响

京津冀地处中纬度欧亚大陆东岸,属暖温带季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温湿润。在全球变暖的背景下,中国区域的气候将向暖湿方向发展^[24-26],京津冀地区的气候也会发生一定程度的变化。张健等^[27]利用线性回归、突变分析和小波分析方法对京津冀地区1960–2006年的降水变化进行了研究,结果表明该地区近47年来的降水量呈下降趋势,气候倾向率为 $-15\text{mm}/10\text{a}$ 。张可慧^[28]详细分析了京津冀地区气候变化对全球气候变暖的响应,发现近百年来京津冀地区气温呈波动上升趋势,与全球气候变暖呈明显的正响应,而降水量的波动较大,但总体呈下降趋势,表现为明显的负响应。

本文选用的区域气候模式^[11]预估数据来源于国家气候中心。高学杰等^[12]通过与观测资料的对比,检验了该区域气候模式对当代气温和降水的模拟性能,结果表明其对中国地区冬季、夏季地面气温和降水的模拟较好,特别是对夏季(汛期)降水型的模拟与观测基本吻合;为了检验其对未来气候的模拟效果,与以往RegCM3在另一个全球模式驱动下的结果进行了对比,发现两个全球模式所预估的降水增(加)减(少)一致率较好。本文利用该区域气

候模式模拟得到的中国区域2001–2100年各气象要素的月平均资料,借助ArcGIS软件的空间分析工具,对京津冀地区21世纪各气象要素的变化趋势进行了分析,结果见图3和表5。

图3为SRES A1B排放情景下,未来京津冀地区的海平面气压、降水量、气温、风速和相对湿度的变化趋势。其中,海平面气压除个别年份外,总体呈增加趋势,气候倾向率为 $0.337\text{hPa}/100\text{a}$;降水量和相对湿度的年际波动比较大,但总体均表现为显著增加趋势,降水量的气候倾向率为 $235\text{mm}/100\text{a}$,相

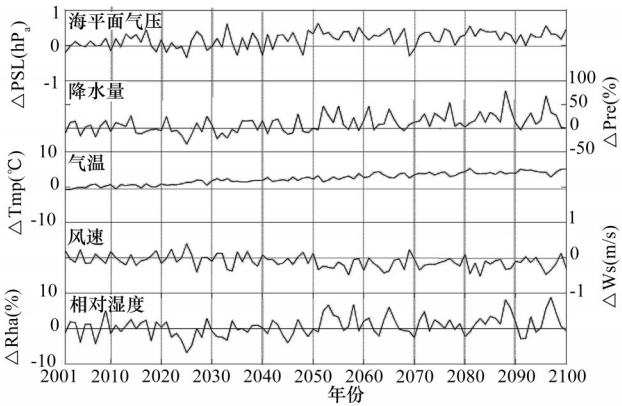


图3 2001–2100年京津冀地区各气象要素的变化
(相对于2001–2010年平均值)

Fig.3 The changes of meteorological factors in Beijing–Tianjin–Hebei region from 2001 to 2100(relative to 2001–2010 average)

表5 未来京津冀地区各气象要素变化(相对于2001–2010年平均值)

Table 5 The changes of meteorological factors in Beijing–Tianjin–Hebei region in the future(relative to 2001–2010 average)													
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2020s	海平面气压(hPa)	0.325	0.301	−0.197	−0.031	0.043	−0.505	−0.149	0.482	0.203	−0.292	−0.069	−0.056
	降水量(mm)	−3.800	−2.300	0.800	−4.000	−2.500	−41.700	59.000	−10.600	−7.300	4.900	−3.000	−2.100
	气温(℃)	1.700	1.700	0.100	0.700	1.200	2.000	0.200	1.000	1.900	1.200	1.500	0.500
	风速(m/s)	−0.127	−0.220	0.253	−0.123	−0.025	0.310	−0.117	−0.070	0.049	−0.114	0.122	0.139
	相对湿度(%)	−2.900	−2.900	−1.600	−0.200	−2.700	−8.200	4.700	−0.700	−3.700	2.200	−1.200	−3.700
2050s	海平面气压(hPa)	0.499	0.718	0.342	0.225	0.817	0.078	0.727	0.441	0.122	0.138	−0.124	0.102
	降水量(mm)	−0.600	3.900	23.300	21.800	35.400	−52.600	8.600	34.300	21.200	21.900	1.600	4.200
	气温(℃)	3.100	3.100	1.900	1.200	2.300	3.800	4.200	2.400	3.200	2.000	2.200	1.800
	风速(m/s)	−0.300	−0.837	−0.369	−0.190	−0.657	0.065	0.382	−0.157	−0.113	−0.605	0.037	−0.157
	相对湿度(%)	1.000	3.800	6.600	9.800	5.800	−8.700	−8.400	3.600	0.800	8.000	5.300	2.800
2090s	海平面气压(hPa)	0.209	−0.027	0.126	0.455	0.738	0.323	0.536	0.737	0.290	−0.100	−0.173	0.379
	降水量(mm)	0.700	0.700	15.400	11.800	49.300	−12.600	23.700	6.900	28.500	19.500	−4.900	8.900
	气温(℃)	4.800	4.200	3.900	3.800	3.700	4.300	4.500	6.100	5.300	3.700	4.500	4.500
	风速(m/s)	0.154	−0.165	0.054	−0.567	−0.549	0.096	0.207	−0.115	−0.280	−0.408	−0.024	−0.360
	相对湿度(%)	0.300	1.900	4.600	6.300	5.800	−3.000	−1.800	−3.800	1.100	5.000	0.600	1.400

2014年1月

对湿度的气候倾向率为 $3.0\%/100a$;气温呈显著上升趋势,其气候倾向率为 $5.1^{\circ}C/100a$;风速呈减小趋势,气候倾向率为 $-0.227m/s/100a$ 。

表5预测列出了京津冀地区各气象要素10年变化的月均值,一共分3个时段:2020s(2021–2030年)、2050s(2051–2060年)、2090s(2091–2100年),分别代表21世纪早期、中期和末期。假设大气污染物排放相对稳定,将表5中京津冀地区3个时段气温、气压、风速、降水量和相对湿度10年变化的月均值分别代入上文得到的回归方程4–方程6中,得到3个城市不同时段各个月份API指数的变化值,结果见图4。从图4可以看出,SRES A1B排放情景下,未来气候变化对京津冀地区空气质量的改善有一定的促进作用。北京的API指数变化幅度远大于天津

和石家庄,3个城市在不同时段的API指数变化峰值均出现在6月份。北京各时段的API指数在6月份有大幅上升,其他月份以下降为主;天津和石家庄的API指数在各时段的波动较小且以下降为主。

4 结论与讨论

本文利用相关分析法和主成分回归分析法详细阐述了京津冀地区3个代表城市(北京、天津和石家庄)的API指数与气象要素的关系,并假设大气污染物排放相对稳定,结合高分辨率区域气候模式模拟结果,探讨未来各气象要素的可能变化及其对京津冀地区空气质量的潜在影响,得到以下结论:

(1)京津冀地区的3个代表城市空气质量最好的时段均为7–9月份,但空气质量最差的时段有所不同。北京受沙尘天气影响较大,春季空气污染最严重,而天津和石家庄受燃煤取暖影响较大,冬季空气污染最严重。通过对首要污染物进行分析,发现可吸入颗粒物(PM_{10})是造成京津冀地区大气污染的主要因素(暂未考虑 $PM_{2.5}$,因2012年以前缺乏 $PM_{2.5}$ 的观测资料)。

(2)北京春季的持续污染比较严重,受沙尘天气的影响很大,而天津和石家庄冬季采暖期的持续污染比较严重。

(3)从相关系数和主成分回归系数的数值可以看出,各气象要素对北京、天津和石家庄空气质量的影响程度存在一定的差异。气温、气压、降水量和相对湿度与3个城市空气质量的关系较为密切。其中,气压与API指数呈显著正相关关系,而其他气象要素与API指数呈显著负相关关系。

(4)利用ArcGIS软件的空间分析工具对来自国家气候中心的区域气候模式预估数据进行了分析。结果表明,未来京津冀地区的海平面气压和气温在21世纪均呈上升趋势;降水量在2020s呈下降趋势,而在2050s和2090s呈现出上升趋势,总体呈上升趋势;风速在21世纪呈减弱趋势;相对湿度在2020s和2050s呈下降趋势,到2090s又逐渐上升,总体呈上升趋势。

(5)SRES A1B排放情景下,未来气候变化对京津冀地区空气质量的改善有一定的促进作用。北京的API指数变化幅度远大于天津和石家庄,3个城市在不同时段的API指数变化峰值均出现在6

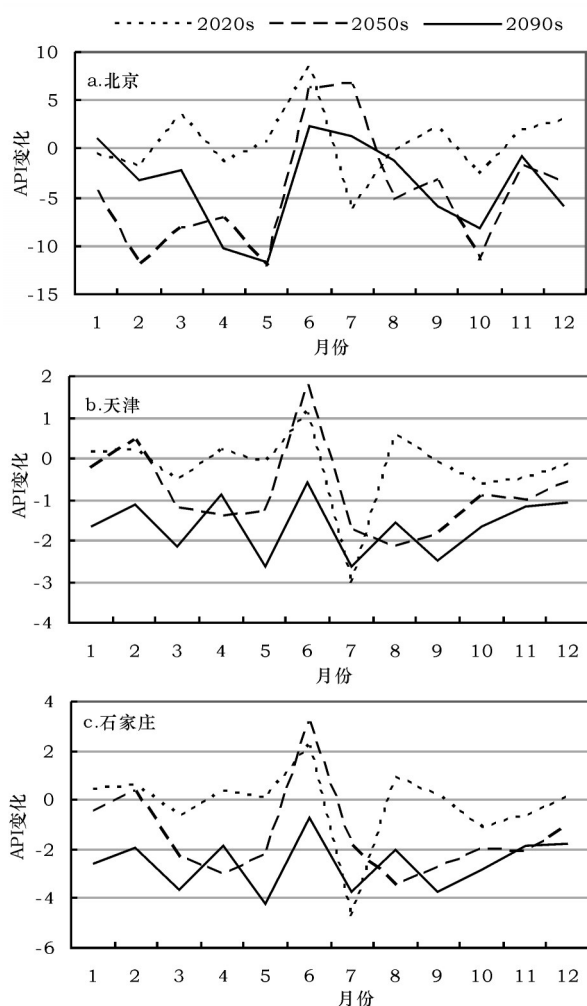


图4 未来京津冀地区API指数变化情况
Fig.4 The future changes of air pollution index in
Beijing–Tianjin–Hebei region

月份。

由于本文只研究了气象要素的可能变化对京津冀地区空气质量的潜在影响,没有考虑污染物和气象要素的综合作用,将来希望能够进一步加强这方面的研究。此外,未来气候变化预估具有不确定性,预测未来气象要素变化对空气质量潜在影响的可靠性依赖于气候模式的不断改善与提高。

致谢:感谢国家气候中心提供的利用区域气候模式所进行的中国区域未来气候变化模拟结果。

参考文献(References):

- [1] 孙家仁,许振成,刘煜,等.气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. 气候与环境研究,2011,16(6):805-814.
- [2] 张裕芬,朱坦,冯银厂,等.气象因素对环境空气质量达标的影响分析[J]. 城市环境与城市生态,2006,19(4):33-36.
- [3] 王淑云,节江涛,熊险平,等.城市空气质量与气象条件的关系及空气质量预报系统[J]. 气象科技,2006,34(6):688-692.
- [4] 隋珂珂,王自发,杨军,等.北京PM₁₀持续污染及与常规气象要素的关系[J]. 环境科学研究,2007,20(6):77-82.
- [5] 周涛,汝小龙.北京市雾霾天气成因及治理措施研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2012,4(2):12-16.
- [6] 张国文,陈义珍,刘厚凤,等.北京PM_{2.5}污染特征的分析[J]. 江西农业学报,2012,24(8):121-124.
- [7] 徐晓峰,李青春,张小玲.北京一次局地重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技,2005,33(6):543-547.
- [8] 刘彩霞,边玮.天津市空气质量与气象因子相关分析[J]. 中国环境监测,2007,23(5):63-65.
- [9] 李国翠,连志鸾,郭卫红,等.石家庄市污染日特征及其与天气背景分析[J]. 气象科技,2006,34(6):674-678.
- [10] 李文杰,张时煌,高庆先,等.京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J]. 资源科学,2012,34(8):1392-1400.
- [11] 吴佳,高学杰,石英,等.新疆21世纪气候变化的高分辨率模拟[J]. 冰川冻土,2011,33(3):479-487.
- [12] 高学杰,石英,张冬峰,等.RegCM3对21世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟[J]. 科学通报,2012,57(5):374-381.
- [13] 孙丹,杜吴鹏,高庆先,等.2001年至2010年中国三大城市群中几个典型城市的API变化特征[J]. 资源科学,2012,34(8):1401-1407.
- [14] 李小飞,张明军,王圣杰,等.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学,2012,33(6):1936-1943.
- [15] 李新令.西安城市气候年变化特征及其与PM₁₀污染特征的相关分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
- [16] 郑美秀,周学鸣.厦门空气污染指数与地面气象要素的关系分析[J]. 气象与环境学报,2010,26(3):53-57.
- [17] 陈添.气象条件对北京市空气质量的影响[J]. 环境保护,2006,5(10):46-49.
- [18] 陈朝晖,程水源,苏福庆,等.北京地区一次重污染过程的大尺度天气型分析[J]. 环境科学研究,2007,20(2):99-105.
- [19] 杨勇杰,谈建国,郑有飞,等.上海市近15a大气稳定性和混合层厚度的研究[J]. 气象科学,2006,26(5):536-541.
- [20] 董继元,王式功,尚可政.降水对中国部分城市空气质量的影响分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(12):43-48.
- [21] 李宗恺,潘云仙,孙润桥.空气污染气象学原理及应用[M]. 北京:气象出版社,1985.
- [22] Statheropoulos M, Vassiliadis N, Pappa A. Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(6):1087-1095.
- [23] 沈家芬,张凌,莫测辉,等.广州市空气污染物和气象要素的主成分分析与典型相关分析[J]. 生态环境,2006,15(5):1018-1023.
- [24] 许吟隆,薛峰,林一骅.不同温室气体排放情景下中国21世纪地面气温和降水变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究,2003,8(2):209-217.
- [25] 江志红,张霞,王冀. IPCC-AR4模式对中国21世纪气候变化情景预估[J]. 地理研究,2008,27(4):787-798.
- [26] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [27] 张健,章新平,王晓云,等.近47年来京津冀地区降水的变化[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(2):74-80.
- [28] 张可慧.全球气候变暖对京津冀地区极端天气气候事件的影响及防灾减灾对策[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):122-125.

The Impact of Meteorological Factors on Air Quality in the Beijing–Tianjin–Hebei Region and Trend Analysis

ZHOU Zhaoyuan^{1,2}, ZHANG Shihuang¹, GAO Qingxian³, LI Wenjie^{1,2}, ZHAO Lingmei^{1,2},
FENG Yongheng^{1,2}, XU Mingjie^{1,2}, SHI Leilei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Air quality is closely related to people's health and lives. It is affected directly by the local emission of air pollutants and local meteorological factors. In this paper, based on observation data from Beijing, Tianjin and Shijiazhuang from 2001-2010, the relationships between the air pollution index (API) and meteorological factors were analyzed using correlation analysis and principal component regression. Assuming that air pollutant emissions are relatively stable, we discuss the potential impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region combining the simulation results of regional climate models. We found that air pressure, air temperature, precipitation and relative humidity are closely related to air quality. The API is positively related to air pressure and negatively related to other meteorological factors. The sea level pressure and air temperature of the Beijing-Tianjin-Hebei region will rise in the future according to regional climate modeling. Wind speed in the 21st century will decrease. Precipitation will decrease in the 2030s, but then the value of precipitation will rise and increase until the end of the 21st century. Relative humidity also has a rising trend, but it will decline in the 2030s and 2050s, then ascend. Under SRES A1B scenario, the future climate change has a certain effect on air quality improvement in Beijing-Tianjin-Hebei region. The future rangeability of API in Beijing is greater than Tianjin and Shijiazhuang. In the three cities, the peak values of API variation appear in June at all times.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; climate change; air quality; air pollution index; meteorological factors