

侯灵, 姚展予. 2012. 环北京地区空气污染指数与降水的周循环特征及其影响机制分析 [J]. 大气科学, 36 (4): 686–696, doi:10.3878/j. issn.1006-9895. 2012.11071. Hou Ling, Yao Zhanyu. 2012. Air pollution index and precipitation weekly circulation characteristics and its possible influencing mechanism analysis over Beijing and its adjacent regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 686–696.

# 环北京地区空气污染指数与降水的周循环特征及其影响机制分析

侯灵 姚展予

中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081

**摘 要** 部分气象要素在某些地区表现出明显的周循环特征, 其位相和尺度因时因地而异。利用 1980~2009 年环北京地区地面常规观测气象要素资料、空气污染指数资料 (简称 API) 及 NCEP/DOE 再分析资料, 本文分析了环北京地区 API、降水及多种气象要素的周变化特征, 并对气溶胶影响降水的可能机制做了初步证明。分析表明: API 表现出明显的周循环特征, 周三最大, 周日最小; 降水频次尤其是小雨频次的周变化特征也较明显, 且与 API 的周变化呈反位相分布; 降水量受 API 影响较小, 其周循环特征未通过置信度为 95% 的显著性检验; 基于云量、温度、相对湿度、大气稳定度及风速的周变化特征分析, 本文推断, 大气气溶胶累积引起对流层低层非绝热加热, 导致大气运动发生变化, 进而对云和降水产生影响, 这为气溶胶间接效应提供了一种可能的影响机制。

**关键词** 空气污染指数 降水 气象要素 周循环

文章编号 1006-9895(2012)04-0686-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11102

## Air Pollution Index and Precipitation Weekly Circulation Characteristics and Its Possible Influencing Mechanism Analysis over Beijing and Its Adjacent Regions

HOU Ling and YAO Zhanyu

Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** Weekly cycles of some meteorological parameters have been found in many regions around the world; however, the phase and magnitude of these cycles vary greatly with regions and seasons. Based on the routine observational meteorological element data, the air pollution index (API) and NCEP/DOE reanalysis data during 1980–2009 over Beijing and its adjacent regions, the weekly circulation characteristics of API, precipitation, and several other meteorological elements have been analyzed, and a preliminary proof of the possible effects of aerosol on precipitation has been presented in this paper. The study indicates that API shows an evident weekly cycle, which reaches the minimum values on Sunday, and then increases to the maximum values on Wednesday. However, the precipitation frequencies, especially for the light rain frequency, demonstrate a significant weekly change with opposite phase distributions to that of API. As for the 24-hour accumulated precipitation amount, aerosols play a trivial effect on it, and the results are rejected at the 5% significance level. According to the weekly variation characteristics of cloud amount,

收稿日期 2011-06-01, 2012-02-07 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2006BAC12B02, 国家“973”全球气候变化重大研究计划 2010CB950804

作者简介 侯灵, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事气溶胶对云和降水影响的研究。E-mail: houling0558@yeah.net

通讯作者 姚展予, E-mail: yaozy@cma.cma.gov.cn

temperature, relative humidity, atmospheric stability, and wind speed, the results have been concluded that the cycles may be triggered by the accumulation of aerosols which causes the nonadiabatic heating in the lower troposphere, and then results in the changes of cloud and precipitation. This conclusion provides a possible indirect effect mechanism of aerosols.

**Key words** air pollution index, precipitation, meteorological parameter, weekly cycle

## 1 引言

人类活动对天气及气候的影响主要包括: 城市热岛、大气污染和全球气候变化。随着工业化、城市化日益加剧, 人类活动排放的污染物迅速增多, 气溶胶通过改变大气成分、辐射及反照率等影响着天气和气候 (Houghton et al., 2001; Ramanathan et al., 2001)。

气溶胶的气候效应在时效上可简单地分为即时影响和气候影响。由于人类活动有明显的周循环规律, 研究发现很多地区的气溶胶及多种气象要素都存在相应的周循环特征, 龚道溢等 (2006) 把这种周循环效应定义为即时影响, 也称周末效应。研究即时影响可为深入了解其气候强迫提供必要的证据。由于目前并未发现任何自然过程能够产生周期为 7 天左右的长时间天气变化, 所以, Dominique and Bernhard (2007) 认为这种周期过程的存在是人类对气候影响的一种表现。

目前, 不少研究尝试把一些长期观测的区域气象要素 (温度、降水、相对湿度等) 与气溶胶相关联, 发现有些地区大气气溶胶和气象要素存在明显的周循环特征, 其位相和幅度则因地理位置和季节不同而不同。而有些地区并未发现明显的周循环特征, 气溶胶的强迫机制及强度仍然存在很大的不确定性。20世纪60年代, 一些研究者讨论了英国地区降水的周循环特征, 但由于不同作者研究区域、研究时段及研究方法各异, 并且缺少显著性检验, 所以最终仍无定论 (Walshaw and Rodgers, 1964; Craddock, 1965; Nicholson, 1969)。Simmonds and Kaval (1986) 发现墨尔本地区温度和降水存在明显的周循环变化, 并把它归因于局地热排放的变化。Beaney and Gough (2002) 研究发现多伦多地区臭氧和温度表现出明显的周末效应, 但在偏远的台站却未发现此规律, 因此, 他们认为周末效应是一种局地现象。Cerveny and Balling (1998) 利用由卫星观测的降水数据, 统计发现美国东北部降水量存在明显的七天周期的循环信号, 并利用臭氧和一氧化碳的周变化解释了降水的周循环特征。然而, DeLisi et al. (2001) 对美国东北部1973~1992年地面降水资

料进行研究, 却未发现明显的周循环特征。研究发现, 近20年来中国地区某些气象要素的周循环特征在不断加强, 温度和降水的周末效应非常明显 (Gong et al., 2006, 2007)。Bell et al. (2008) 利用卫星反演的降水资料研究发现, 夏季降水区和降水强度都存在明显的周变化, 台站观测的降水的变化趋势与由卫星反演得到的降水的周变化位相一致。而Schultz et al. (2007) 利用美国219个地面观测站1951~1992年的降水数据对降水强度和降水频率进行统计分析, 却没有发现明显的周循环特征。

气溶胶浓度的增加, 会引起大气物理特征如能量平衡、云凝结核性质及局地云形成的变化, 进而可能影响降水。华北地区作为中国城市化发展最快的地区之一, 20世纪80年代以来城市化、工业化迅猛发展, 大气污染物不断增加, 降水尤其是小雨不断减少 (Zhao et al., 2006; Qian et al., 2009), 对农业生产造成了严重影响。华北地区气溶胶对长期气候变化的影响已有不少研究 (段婧, 2008; 段婧和毛节奏, 2008; 房文, 2008; Qian et al., 2009), 但气溶胶的即时效应还很少被关注, 本文尝试通过分析环北京地区一些主要台站的API和气象要素的周循环特征说明气溶胶对降水的可能影响机制。

## 2 资料和分析方法

文中使用的资料主要有地面常规观测资料 (降水、云量、温度、相对湿度、大气稳定度及风速)、空气污染指数资料 (简称API) 及NCEP/DOE再分析资料。本文主要按照2.1.2节提到的方法分别对各要素原始资料进行相关处理之后, 针对数据的分布特征, 分别利用 $t$ 检验 (Wilks, 2006) 和卡方拟合优度检验 (魏凤英, 2009) 进行统计分析, 并利用谐波分析、功率谱分析和小波分析 (黄嘉佑, 2007) 验证了周循环的存在。

### 2.1 降水资料

#### 2.1.1 资料来源

日均降水数据由中国地面气候资料日值数据集中获取, 本文选取了环北京地区的14个常规地面观测站 (图1), 研究时段为1980年1月1日至2009年12月31日。

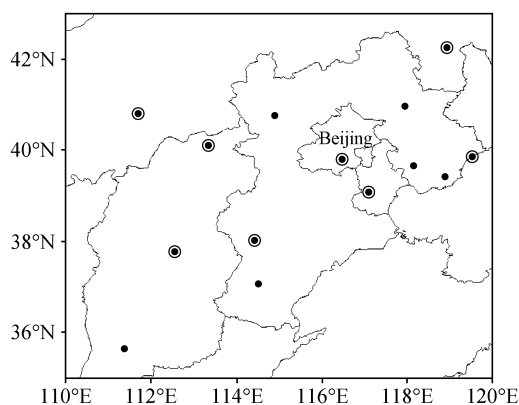


图1 研究区域。黑点：常规气象要素观测台站；圆圈：API 观测台站  
Fig.1 Distribution of the research stations, the locations of daily meteorological elements observation stations are represented by solid circles, and the stations with API (air pollution index) observations are represented by large circles

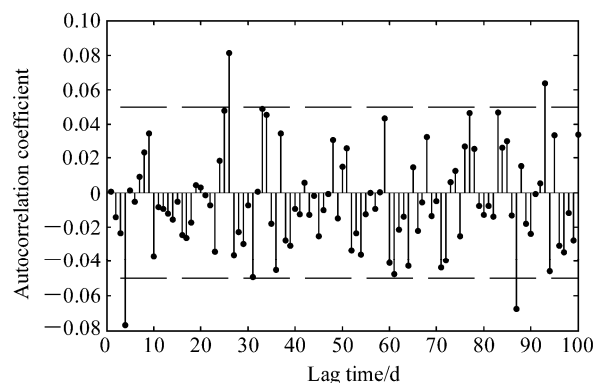


图2 北京站样本A的滞后长度为1~100的自相关系数分布。虚线表示0.05的自相关水平  
Fig.2 The autocorrelation coefficients for the lag length of 1~100 from one sample of Beijing station. The autocorrelation level of 0.05 is represented by dashed lines

### 2.1.2 数据处理

(1) 降水量 各台站的原始数据都是高度偏斜的，为了减小数据的偏斜度，本文首先剔除了降水量为微量（日降水量小于0.1 mm）及更少的日子。此外，为了使序列更偏向于近正态分布，对日降水序列开八次方。本文分析的降水序列长达30年，为了避免年循环对周循环信号的干扰，文章采用两次标准化处理：首先，利用各台站30年月均值和月标准差值对日均降水量序列进行标准化处理剔除年循环信号；其次利用各日年均值和标准差再次进行标准化处理，即得到剔除了年循环信号的标准化的日降水数据。

参数化检验要求数据必须是独立的，为了消除连续性降水数据之间的依赖性，本文把每个台站经过标准化处理的数据随机分配到两个子样本中。为了检测通过上述转化得到的各个台站降水量的序列独立性，本文对28个样本（14个台站，每站2个）进行了滞后长度为1~100的自相关检验。假设序列无相关的话，样本的期望显著自相关系数应不超过0.05。图2显示的是北京站的一个子样本，由图可知，自相关系数都较小，只有四个滞后长度的自相关系数大于0.05，所有自相关系数均小于0.08，其他27个样本的自相关分布也显示出相似的特征。显著的滞后相关都没有落在较大的或者较小的滞后长度中，说明序列的相关性已经足够小。

为了确保每周各日的降水分布和方差相似，本文对28个样本分别做了标准Q-Q (Quantile-Quantile) 图 (Wilks, 2006)，Q-Q图是散点图，每一个坐标对

表示的是包含观测值和通过拟合分布的百分位函数反演得到的估计值对应的一个点。直线斜率为正表示观测数据基本遵循正态分布，直线的斜率即为正态分布的方差，当  $x$  为0时， $y$  值表示正态分布的均值。图3显示了196个（28个样本，每周7日）Q-Q图中的两个个例，图中的点表示观测数据的分布，观测数据的均值和方差即直线表示的正态分布的均值和方差，点距直线越近，表示数据越接近于正态分布。由图3可知，两个样本中观测点距直线均较近，说明数据接近正态分布，并且两样本均值和方差都较相近，差别不大。而其他194个样本的分布也相似，即各台站每周各日降水量均基本符合标准近正态分布。

统计中，通常多站平均比单站数据更能体现数据的统计特征 (DeLisi et al., 2001)。因此，除了单独分析14个台站数据特征，本文还将14个包含微量和未降水日子的原始数据集各日降水值对应求和并进行区域平均。将区域平均样本分为四组子样本，共做了28个（4个样本，每周7日）标准Q-Q图。结果显示，区域平均样本中每周各日的Q-Q图分布相似，说明区域平均样本同样为近正态分布。

(2) 降水频次 本文首先选取14个台站原始降水数据序列中日均降水量大于等于0.1 mm的数据作为单个台站的降水频次数据。为了减少数据之间的相关性，本文对每个台站的数据都随机排列，针对每个样本做滞后长度为1~100的自相关检验，结果发现，降水频次数据之间相关性较小，数据独立性较强。此外，和降水量一样，对14个台站的降水

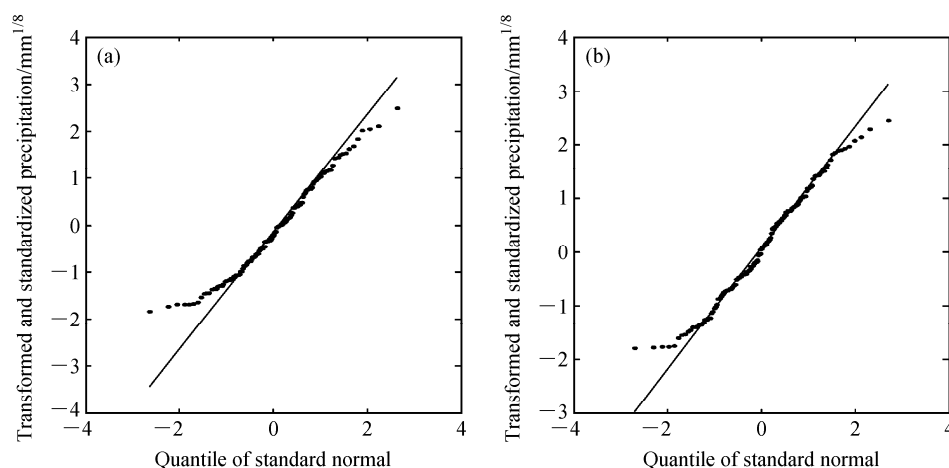


图3 经过转化和标准化之后 (a) 周一呼和浩特和 (b) 周三张家口站降水样本的标准Q-Q图

Fig.3 Normal Quantile-Quantile plot of transformed and standardized precipitation from (a) Monday, Hohhot sample 1 and (b) Wednesday, Zhangjiakou sample 2

频率数据进行区域平均。利用自相关检验,发现区域平均降水频次序列的独立性较好。

## 2.2 API

本文选用的API资料下载于中华人民共和国环境保护部官方网站 ([http://datacenter.mep.gov.cn/report/air\\_daily/air\\_dairy.jsp](http://datacenter.mep.gov.cn/report/air_daily/air_dairy.jsp) [2011-01-16]), 每日的API表征了每日最主要污染物浓度的日均值。文章选取了北京及周边的8个主要城市台站从初始观测之日到2010年12月31日的API数据,其中大同和赤峰的数据是从2005年开始观测的,秦皇岛从2001年6月开始观测,而其他五个台站均是从2000年6月开始观测的。

利用浓度转化表 ([http://www.gdepb.gov.cn/xcyjy/hjzs/daqi/200510/t20051020\\_18510.html](http://www.gdepb.gov.cn/xcyjy/hjzs/daqi/200510/t20051020_18510.html) [2011-01-18]), 本文首先将各台站的API数据转化为对应的大气污染物质量浓度;对各站数据进行随机排列后,做滞后长度为1~100的自相关检验,发现数据序列独立性较好;对每周各日各台站API做标准Q-Q图,分析发现转换后的观测值基本符合近正态分布。

## 2.3 其他气象参数

本文还选取了环北京地区14个主要城市台站1980~2009年日均云量、温度和水平速度,剔除未观测数据之后,进行统计 $t$ 检验,以了解各气象要素的周变化特征。从全球高空规定层、对流层定时值数据集中得到1980~2009年850~500 hPa高度上的温度和露点温度数据,日均值由0000 UTC和1200 UTC的均值得到,以此了解对流层中低层大气

稳定度的变化情况。此外,本文使用了1980~2009年美国国家环境预测中心能源部(NCEP/DOE)再分析资料中的925~850 hPa的垂直速度场资料,借此了解环北京地区对流层低层由大气稳定状况引起的垂直速度场的周变化特征。为了证明各数据的独立性和近正态分布,本文做了类似于区域平均降水序列的处理。

## 3 数据分析

### 3.1 API的周循环特征

为了表征API的周变化特征,本文分别对夏季及全年每周各日API进行距平分析之后,对所有台站区域平均,得到每周各日平均API距平序列。如图4所示,API异常表现出明显的周变化特征,不论是夏季还是全年,API距平都表现出周三最大,周日最小,从周日开始持续增长到周三然后开始下降。夏季周循环的幅度比全年略大,这可能是因为:(1)夏季严重污染或相对干净的天数较多,大气污染物对短期气候的影响更强;(2)相对于其他三个季节,夏季气溶胶尺度分布更均匀,而尺度分布对于云粒子核化非常重要,进而加强气溶胶间接效应(Dusek et al., 2006)。

为进一步研究API的周循环特征,本文对8个台站夏季和全年平均每周各日API的最大值(周三)与最小值(周日)差异进行了单尾 $t$ 检验(魏凤英, 2009)。原假设为周三的平均API比周日小。检验结果见表1,由表可知,原假设成立的可能性 $p$ 值均小于0.05,所以不论是夏季还是全年的

API, 在置信度为 95% 的水平下都拒绝原假设, 即认为周三的 API 比周五大得多, API 存在明显的周末效应。

表 1 夏季及全年每周各日 API 最大值与最小值差异的统计 *t* 检验

|    | <i>t</i> | 自由度  | <i>p</i> |
|----|----------|------|----------|
| 夏季 | 2.04     | 1013 | 0.021    |
| 全年 | 1.76     | 3904 | 0.039    |

为了使得 API 的周循环特征更具有说服力, 本

文先用谐波分析剔除各台站所有观测年份 API 序列的低频变化 (周期大于一个季度), 然后分别对各个台站进行功率谱分析和小波分析 (黄嘉佑, 2007)。对所有台站功率谱分析的结果进行区域平均, 图 5 显示了本文关注的较短周期的平均功率谱, 如图所示, API 存在明显的周期性变化, 6~8 天的周期比较明显, 通过了置信度为 95% 的显著性检验 (标准谱卡方检验)。8 个台站的平均小波能量谱分析也得到相似的结果 (图 6), 7 天左右周期的小波谱比较明显, 在总体小波谱上也通过了 95% 的置信度检验。图 6b 是用小波分析得到的 4~8 天震荡的带通滤波, 一周左右的振荡在各个季节均比较明

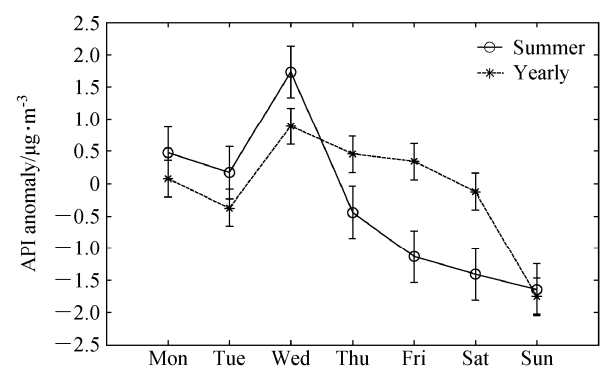


图 4 夏季及全年环北京地区区域平均 API 距平的周循环特征  
Fig.4 Weekly change characteristics of summer and yearly API anomalies averaged over Beijing and its adjacent regions. Mon: Monday; Tue: Tuesday; Wed: Wednesday; Thu: Thursday; Fri: Friday; Sat: Saturday; Sun: Sunday

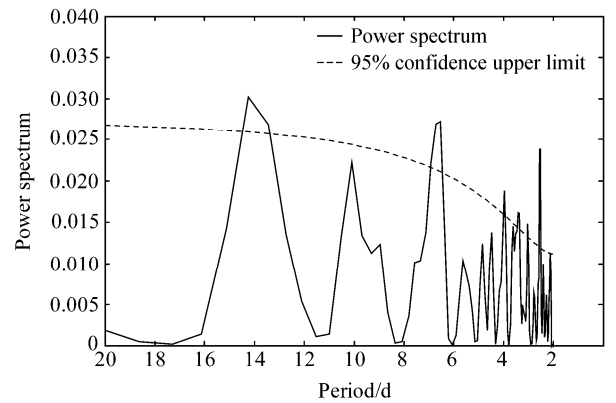


图 5 环北京地区区域平均 API 的功率谱。虚线表示 0.05 显著水平的置信上限  
Fig.5 The power spectrum of API averaged over Beijing and its adjacent regions. 95% confidence upper limit is represented by the dashed line

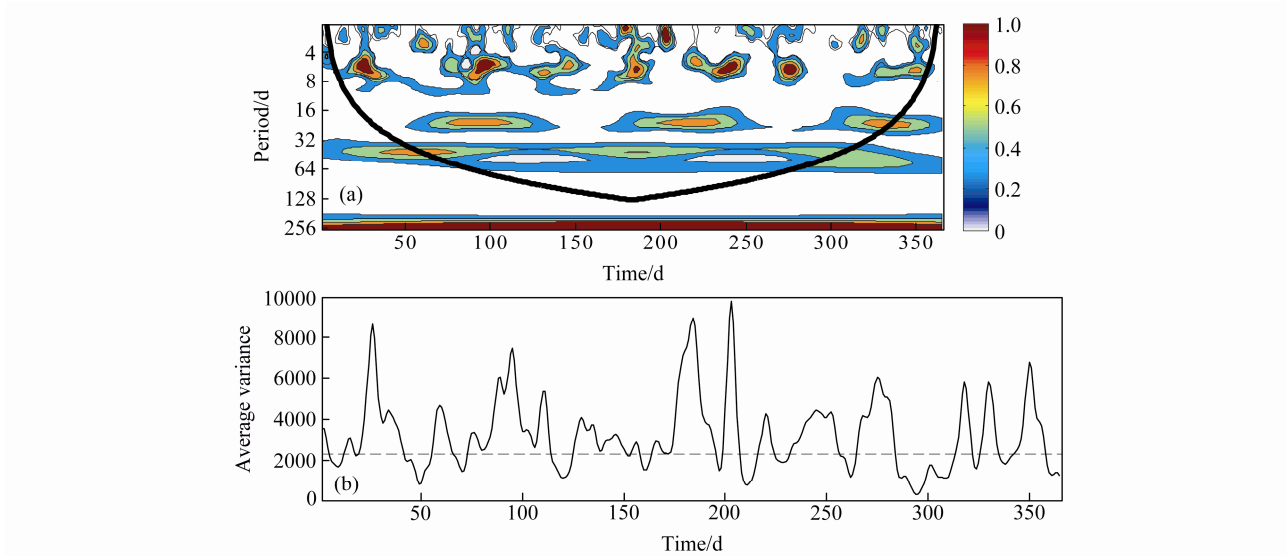


图 6 (a) 小波能量谱 (黑色粗等值线以内范围表示通过 95% 信度检验, 等值线以下不可信); (b) 4~8 天尺度的平均小波能量曲线 (实线) 和 95% 信度线 (虚线)  
Fig.6 (a) Wavelet analysis power spectrum, the region within the black bold isoline represents that the corresponding period is significant at the 5% level; (b) the energy spectrum of 4-8 days wavelet analysis (solid) and the confidence lower limit at 95% level (dashed)

显, 夏季最明显, 但在季节交替的时间段一周左右的振荡显著性略差。

单个变量与总方差的方差比定义为该变量的解释方差 (黄嘉佑, 2007), 本文将 4~8 天带通滤波序列方差与原 API 序列方差之比作为该周期低频振荡的解释方差, 分析发现, 各个台站 API 序列中, 4~8 天周期的解释方差均达到 20% 以上。8 个台站平均序列的解释方差高达 27%, 这说明 4~8 天周期是 API 序列中的主要周期之一。

3.2 降水的周变化特征

3.2.1 降水量的周循环特征

为了探究各台站和区域平均每周各日的降水量是否存在明显的峰值和谷值, 本文对每个样本进行单因素方差分析 (ANOVA) (Wilks, 2006), 原假设为每个样本中每周 7 日的日均降水量相等。当单站的两个子样本均满足或区域平均样本的四个子样本中至少有两个满足  $p$  值小于 0.05 的时候, 即认为结果显著。从单站 (表 2) 和区域平均样本 (表 3) 的单因素方差分析结果可以发现, 不论是单站还是区域平均样本, 都没有通过显著水平为 0.05 的  $F$  统计检验, 这说明各个台站中每周 7 日的降水量大致是相等的, 没有显著差异。

表 2 单个台站降水量样本的单因素方差分析  
Table 2  $F$  statistics and  $p$  values from one-way analysis of variance (ANOVA) test on the individual-site precipitation amount samples

| 台站   | 样本 1 |       | 样本 2 |       |
|------|------|-------|------|-------|
|      | $F$  | $p$   | $F$  | $p$   |
| 呼和浩特 | 0.94 | 0.463 | 1.44 | 0.197 |
| 大同   | 1.01 | 0.414 | 0.74 | 0.620 |
| 石家庄  | 1.73 | 0.112 | 2.01 | 0.062 |
| 太原   | 1.73 | 0.110 | 1.43 | 0.201 |
| 邢台   | 0.59 | 0.740 | 0.87 | 0.515 |
| 保定   | 1.25 | 0.280 | 0.53 | 0.782 |
| 赤峰   | 0.17 | 0.985 | 1.71 | 0.319 |
| 张家口  | 0.55 | 0.774 | 1.34 | 0.236 |
| 承德   | 0.98 | 0.440 | 0.65 | 0.694 |
| 秦皇岛  | 0.75 | 0.611 | 0.33 | 0.922 |
| 北京   | 0.29 | 0.943 | 0.87 | 0.518 |
| 天津   | 0.69 | 0.661 | 0.77 | 0.592 |
| 唐山   | 1.03 | 0.403 | 1.55 | 0.159 |
| 乐亭   | 0.65 | 0.694 | 0.42 | 0.866 |

表 3 14 个台站对应日期降水量之和的单因素方差分析  
Table 3  $F$  statistics and  $p$  values from ANOVA tests on the composite precipitation amount samples

| 样本 1 |       | 样本 2 |       | 样本 3 |       | 样本 4 |       |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| $F$  | $p$   | $F$  | $p$   | $F$  | $p$   | $F$  | $p$   |
| 1.89 | 0.079 | 0.76 | 0.599 | 0.94 | 0.463 | 0.75 | 0.613 |

为了进一步确定每周各日降水量均值的差异是否显著, 本文利用学生双尾  $t$  检验进行了分析, 原假设定义为每周各日降水量的均值相同, 将各台站及区域平均样本中每周 7 日的降水量数据进行两两检验, 每个样本进行 21 次  $t$  检验。对 32 个子样本结果分析发现, 无论是单站还是区域平均样本, 每周各日的数据都没有通过显著水平为 0.05 的  $t$  检验, 这说明, 各样本中每周七天中任意两天的降水量之间没有显著差异。

对日降水量的研究没有发现明显的周循环, 这表明由气溶胶的间接效应引起的降水量的变化可以忽略。强降水事件有很大的随机性, 降水量受很多因素影响, 如云的生命尺度等 (龚道溢等, 2006), 与气溶胶相比, 它们对降水量的影响更重要。

3.2.2 降水频次的周循环特征

夏季近地面层温度较高, 大气稳定度相对其他季节较差, 气溶胶随对流被带到云中作为云凝结核的机会增多, 参与云中微物理过程影响降水, 使得气溶胶间接效应表现更明显 (龚道溢等, 2006); 且华北地区夏季降水频次相对于其他季节明显要高, 所以本文选取夏季降水频次进行分析。

由于降水频次序列的分布未知, 本文采用非参数检验 (卡方拟合优度检验) (Wilks, 2006) 研究每个样本每周各日降水频次的差别。原假设定义为单个样本中每周各日降水频次相等, 只要一一周中任何一天的降水频次与其他各日有明显差别, 则拒绝原假设。

本文分别对夏季总降水频次和夏季小雨 ( $\leq 10$  mm/d) 频次进行了分析, 结果表明, 夏季总降水频次的 14 个台站样本中, 有 10 个通过了置信度为 95% 的卡方拟合优度检验 (表 4); 而小雨降水频次样本中有 11 个通过了置信度为 95% 的卡方拟合优度检验; 总降水频次和小雨频次的区域平均值都通过了显著性检验, 则说明即使部分台站每周各日降水频次变化特征不明显, 但是环北京地区每周各日降水频次确实存在较大差别, 降水频次的周变化序列存在明显的峰值和谷值, 这说明 7 天中至少有一天的降水频次与其他日相比有明显差异。

表 4 各台站和区域平均的夏季总降水频次和小雨频次的卡方拟合优度检验

Table 4 Statistics and  $p$  values from chi-square tests on the total precipitation frequency and light rain frequency for the composite-site and individual-site summer samples, separately

| 台站   | 总降水频次         |              | 小雨频次         |              |
|------|---------------|--------------|--------------|--------------|
|      | $\chi^2$      | $p$          | $\chi^2$     | $p$          |
| 呼和浩特 | <b>0.972</b>  | <b>0.987</b> | 12.974       | 0.042        |
| 大同   | 13.043        | 0.042        | 13.892       | 0.031        |
| 石家庄  | 12.671        | 0.049        | 13.429       | 0.038        |
| 太原   | 23.258        | 0.001        | 20.010       | 0.003        |
| 邢台   | 13.972        | 0.030        | 13.141       | 0.041        |
| 保定   | 15.064        | 0.021        | 13.219       | 0.040        |
| 赤峰   | <b>12.516</b> | <b>0.051</b> | <b>2.141</b> | <b>0.906</b> |
| 张家口  | 13.917        | 0.031        | 12.747       | 0.047        |
| 承德   | <b>1.527</b>  | <b>0.958</b> | <b>2.531</b> | <b>0.865</b> |
| 秦皇岛  | <b>2.537</b>  | <b>0.864</b> | <b>2.051</b> | <b>0.915</b> |
| 北京   | 12.926        | 0.044        | 14.255       | 0.028        |
| 天津   | 13.862        | 0.031        | 13.176       | 0.041        |
| 唐山   | 14.042        | 0.029        | 12.864       | 0.046        |
| 乐亭   | 17.453        | 0.009        | 15.799       | 0.015        |
| 区域平均 | 13.802        | 0.033        | 18.118       | 0.006        |

注：黑体表示未通过显著性检验。

为了降低噪音干扰，本文对 14 个台站样本进行区域平均。由图 7a 可见，环北京地区夏季降水频次有明显的周循环特征，周三最小，极大值出现在周五。进一步分析夏季小雨频次的周变化可以发现，小雨频次的周循环特征与总降水频次基本一致，但变化幅度比总降水频次略大，这说明夏季总降水频次的周变化特征主要与小雨频次的变化有关。

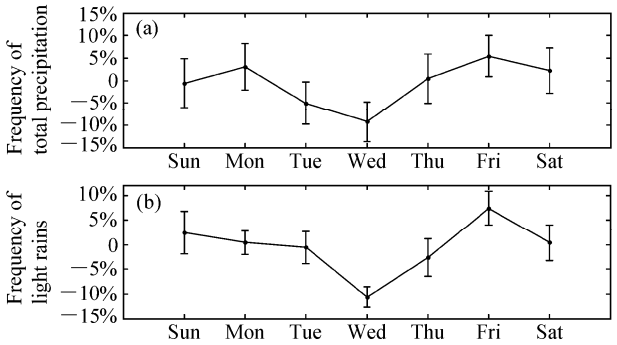


图 7 环北京地区夏季日降水频次的周变化特征：(a) 总降水频次；(b) 小雨频次

Fig.7 Weekly changes of (a) total rainfall frequency and (b) light rain frequency in summer over Beijing and its adjacent regions

为了进一步探究降水频次的周循环特征，本文对周平均降水频次最小值（周三）和最大值（周五）差异进行卡方拟合优度检验，结果发现，区域平均样本中，总降水频次及小雨频次均通过了置信度为 95% 的显著性检验。此外，本文利用与前文相同的滤波方法，依次对夏季小雨及总降水频次序列进行谐波分析，然后对滤波结果进行功率谱分析。夏季小雨频次的功率谱如图 8 所示，6~8 天的周期比较明显，通过了置信度为 95% 的显著性检验，总降水功率谱也显示出相似的分布特征。对区域平均样本进行带通滤波发现，7 天左右周期的正弦波对于降水频次序列的解释方差能达到 24.5%。

综上分析可以发现，每周各日降水频次（包括总降水频次和小雨频次）表现为周三最小，周五较大，周末明显大于周中；API 周三最大，周末较小，与降水频次大致呈反位相分布。将 API 与降水频率尤其是小雨频率的周循环特征联系起来，可以大胆推断，周中气溶胶对小雨的发生有抑制作用，这与气溶胶的第二间接效应一致。

#### 4 可能的解释和讨论

电厂燃煤和民用燃烧等人为源排放的气溶胶是相对稳定的，周变化不大，而有限的观测资料表明华北地区与交通运输和工业排放有关的颗粒物和黑炭周末排放较少 (Liu et al., 2006)。气溶胶在对流层低层存在的时间尺度一般为几天，如果颗粒物生成的速度快于通过干/湿沉降被消除的速度的话，则会在对流层低层逐渐累积 (唐孝炎等, 2006)，因此对应的 API 应该是周五达到峰值。而本文的研究结果显示，API 最大值出现在周三，最小值出现在周日。Gong et al. (2007) 研究认为，大气污染物周

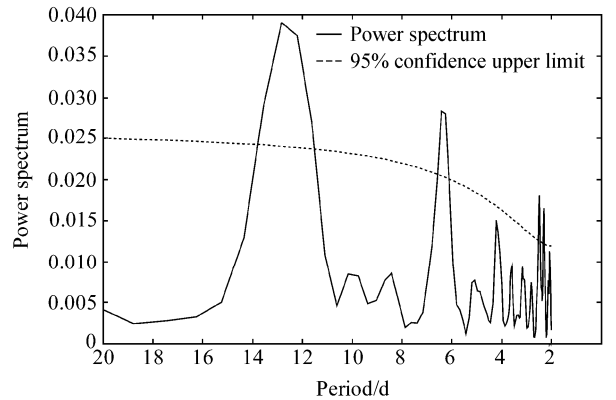


图 8 夏季小雨频次功率谱

Fig.8 The power spectrum of light rain frequency in summer

循环的位相与气溶胶累积引起的对流层低层非绝热加热, 导致大气循环的变化有关。

气溶胶对云和降水的影响主要决定于大尺度环境场, 尤其是相对湿度、云的特征和气溶胶的本质属性。小于 19  $\mu\text{m}$  的云滴主要通过凝结增长, 很难形成较大的雨滴, 只有云滴增长达 20  $\mu\text{m}$  以上时, 才能有效启动重力碰并机制, 形成降水粒子。云量的周变化特征显示 (图 9a), 周中云量较多, 从周中到周末云量不断减少, 这可能与周中 API 较高, 气溶胶随对流进入云中以凝结核的形式存在, 如果云凝结核过多, 则形成更多较小而均匀的云滴, 不利于碰并增长, 云滴很难获得足够的水汽增长到临界半径以上形成降水粒子。同时, 较弱的对流就能将细小的云滴带到对流层中, 在高层形成冰晶和高云, 会导致云量增加(黄美元和徐华英, 1999)。分别对每周各日云量最大值(周四)和最小值(周日)差异及周中(周二、周三、周四和周五均值)和周末(周六、周日和周一均值)云量差异进行配对  $t$  检验 (表 5), 结果通过了置信度为 95% 的显著性检验, 这说明云量的周循环特征比较明显。

Ramanathan et al. (2001) 研究发现, 印度洋和亚马逊地区, 吸热气溶胶会加热最下面 2~4 km 的大气层。利用 850~500 hPa 的日均温度代表对流层中低层温度状况, 研究发现 (图 9b), 对流层中低层从周末到周中呈现出逐渐增暖, 日均温度周四最高, 周日最低; 而地面台站观测的日均温度数据却显示出相反的变化趋势 (图 9c), 周四最小, 周末

较大。不论是对流层中低层还是地面, 日均温度最大值与最小值及周中与周末的差异均通过了置信度为 95% 的单尾  $t$  检验。周中云量增加, 云和吸热气溶胶共同作用会导致对流层低层日均温度、DTR 和总辐射增多, 由于总能量守恒, 上层吸收的能量增多必然导致低层接收到的总辐射减少, 致使地面日均温度和 DTR 减少 (Gong et al., 2006; 邓涛等, 2010); 周末反之, 上层云量减少, 则地面接收到的总辐射增加, 地面日均温度升高。

表 5 各气象要素周变化特征的  $t$  检验  
Table 5 The  $t$  statistics and  $p$  values of weekly change characteristics for each meteorological parameter

|        | 周四—周日  |                        | 周中—周末  |       |
|--------|--------|------------------------|--------|-------|
|        | $t$    | $p$                    | $t$    | $p$   |
| 云量     | 2.115  | 0.017                  | 1.697  | 0.045 |
| 地面日均温度 | -3.400 | $3.373 \times 10^{-4}$ | -1.790 | 0.038 |
| $T_T$  | 3.623  | $1.458 \times 10^{-4}$ | 2.541  | 0.006 |
| 地面水平速度 | 2.715  | 0.013                  | 1.924  | 0.041 |
| 垂直速度   | -1.656 | 0.049                  | -0.550 | 0.709 |

注:  $t < 0$  表示该气象要素周四的观测值小于周日的观测值; 黑体表示未通过置信度为 95% 的显著性检验。

边界层辐射加热, 云边界云滴蒸发导致云表冷却, 使对流层中低层稳定度减弱 (Koren et al., 2004), 对流层中低层不稳定增加使得垂直运动增强。本文利用总指数  $T_T$  (Miller, 1967) 来研究大气稳定度的周循环特征,

$$T_T = T_{d850} + T_{850} - 2 T_{500},$$

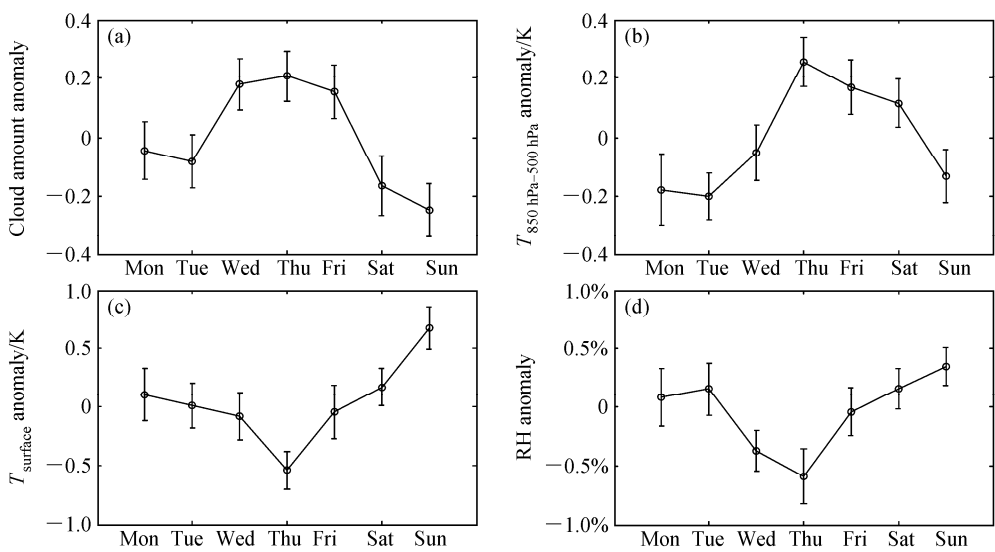


图 9 各气象要素的周循环特征: (a) 总云量; (b) 对流层中低层日均温度; (c) 日均地面温度; (d) 日均地面相对湿度  
Fig.9 The weekly change characteristics of four meteorological parameters: (a) Total cloud amount anomaly; (b) daily temperature anomaly in the lower troposphere; (c) daily temperature anomaly at the surface; (d) daily average relative humidity anomaly at the surface



其中,  $T_{d850}$  表示 850 hPa 高度层上的露点温度,  $T_{500}$  和  $T_{850}$  分别表示 500 hPa 和 850 hPa 高度层的大气温度,  $T_T > 44$  表示发生强对流的可能性较高。台站观测数据表明 (图 10a), 每周各日平均  $T_T$  都大于 44, 周平均为 55 K,  $T_T$  从周三以后迅速增加, 这说明周三以后出现强对流的可能性增大, 周四、周五达到最大, 这表明这段时间垂直大气运动异常增强, 这个从垂直运动的周变化中得到了验证。

利用 NCEP/DOE R2 925~850 hPa 的垂直速度来表征对流层低层的垂直速度, 分析发现, 日均垂直速度在周四和周五明显降低, 最小值出现在周四 (图 10b)。这意味着周四和周五存在异常垂直上升运动。此外, 分析每周各日出现垂直上升速度的频率可以发现 (图 10c), 周四和周五出现垂直上升运动的机会最多, 周末较少。垂直上升通常伴随着低层辐合, 这经常会引起近地面强风, 增强垂直通量, 引起较高层运动较快的空气被输送到较低层。因此, 后半周近地面正的水平风速异常, 易引起同期异常的垂直上升运动, 若水汽来源能及时补充, 较强的对流会使得原本因水汽争食无法产生降水的云中更多的云水转化成雨水, 使得降水频次增多, 地面日均相对湿度周末明显增大 (图 9d)。

周中, 对流层中低层出现正的温度异常与增强的垂直运动有较好的对应。干对流或湿对流都能导致高层加热, 这是由于 (1) 低层较暖的空气会输送到中层和高层; (2) 颗粒物中吸热气溶胶的加热

效应会传输到高层, 高层加热具有热泵的作用, 反过来又能增强低层的上升运动。结果, 辐射加热引起的强风和增强的垂直运动可能会使得气溶胶辐射, 而小雨频次的增多, 湿沉降作用加强, 导致后半周 API 逐渐减少。

这些分析表明中国地区 API 和气象要素间可能存在一种自反馈机制: 周初, 大气气溶胶逐渐累积, API 逐渐增大, 上升气流将气溶胶带至云中以云凝结核的形式存在; 周中, 通过气溶胶和云的共同作用引起辐射加热, 对流层中低层温度升高使得对流层中低层更不稳定, 引起异常的垂直运动和近地面强风 (Gong et al., 2007); 强风以及增强的垂直运动会导致周末低层气溶胶扩散, API 逐渐减少, 降水次数尤其是小雨频次明显增加。

## 5 结果与讨论

(1) API 周变化特征明显, 周三最大, 周日最小; 最大值与最小值差异通过了置信度为 95% 的  $t$  检验; 功率谱分析和小波分析均发现 4~8 天的周期较为明显, 其解释方差高达 27%。

(2) 日总降水量和日小雨量均未发现明显周循环特征; 夏季降水频次尤其是小雨频次的周变化表现为周三最小, 周末较大, 最大值与最小值差异通过了置信度为 95% 的卡方拟合优度检验。功率谱分析显示, 降水频率的一周左右的周期通过了显著性检验。

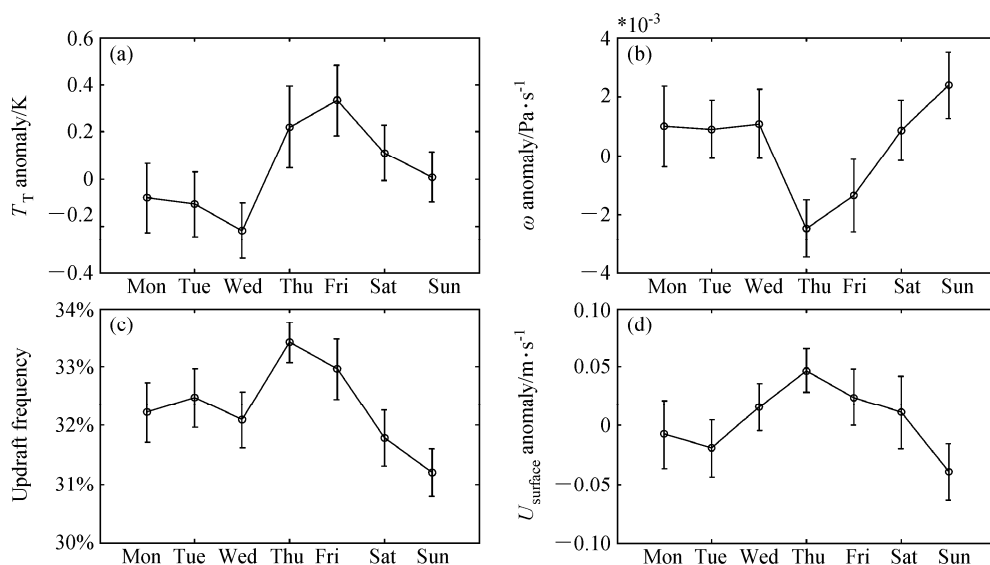


图 10 大气稳定性和速度的周变化特征: (a) 大气稳定性; (b) 925~850 hPa 高度层的垂直速度; (c) 925~850 hPa 高度层上升速度出现频率; (d) 地面水平风速

Fig.10 Weekly changes of atmospheric stability and velocity: (a) Atmospheric stability anomaly; (b) vertical wind velocity anomaly; (c) updraft frequency in the lower troposphere between 925 and 850 hPa levels; (d) horizontal velocity anomaly at the surface

(3) 多种气象要素均表现出明显的周变化, 云量、对流层下层日均温度、大气稳定度、上升速度出现频率及水平速度均表现为周中较高, 周末较低。而地面日均温度和对流层下层的垂直速度则表现出相反的位相特征。各气象要素的周最大值与最小值及周中与周末的差异基本通过了显著性检验。

(4) API 和气象要素间可能存在一种自反馈机制: 气溶胶累积, API 逐渐增大, 引起对流层低层非绝热加热, 导致大气动力和热力特征发生变化, 影响云的发展, 进而对降水产生影响。

相对于区域气象要素和 API 的长期变化特征, 二者的周循环特征分析能够帮助读者理解气溶胶是如何影响天气和气候的。本文研究发现, API 与小雨频率的周变化特征显著, 二者呈反位相分布, 但由于小雨事件观测精度及采用的分析方法等误差限制, 究竟是周中气溶胶累积引起同期小雨频率较低, 抑或周末小雨频率较高导致的同期 API 较低, 目前仍无定论。并且, 由于降水特征受多重因子影响, 而目前 API 观测站及观测次数有限, 研究气溶胶对降水的影响仍存在着困难和争论。本文试图通过统计方法说明 API 对云和降水的影响, 希望能为以后的研究提供一些依据。

**致谢** 感谢龚道溢教授在数据处理中给予的指导, 感谢胡志晋研究员和段婧博士对本文提出的有意义的修改意见。

## 参考文献 (References)

- Dominique B, Bernhard V. 2007. An unexpected pattern of distinct weekly periodicities in climatological variables in Germany [J]. *J. Geophys. Res.*, 34: L03819, doi: 10.1029/2006GL028559.
- Beaney G, Gough W A. 2002. The influence of tropospheric ozone on the air temperature of the city of Toronto, Ontario, Canada [J]. *Atmos. Environ.*, 36 (14): 2319–2325.
- Bell T L, Rosenfeld D, Kim K M, et al. 2008. Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D02209, doi: 10.1029/2007JD008623.
- Cerveny R S, Balling R C Jr. 1998. Weekly cycles of air pollutants, precipitation and tropical cyclones in the coastal NW Atlantic region [J]. *Nature*, 394 (6693): 561–563.
- Craddock J M. 1965. More rainfall statistics [J]. *Weather*, 20: 44–50.
- DeLisi M P, Cope A M, Franklin J K. 2001. Weekly precipitation cycles along the Northeast Corridor? [J]. *Wea. Forecasting*, 16 (3): 343–353.
- 邓涛, 张镭, 陈敏, 等. 2010. 高云和气溶胶辐射效应对边界层的影响 [J]. *大气科学*, 34 (5): 979–987. Deng Tao, Zhang Lei, Chen Min, et al. 2010. The influence of high cloud and aerosol radiative effect on boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (5): 979–987.
- 段婧. 2008. 气溶胶对区域云和降水影响的研究 [D]. 北京大学博士研究生学位论文. Duan Jing. 2008. Study on influence of aerosol on regional precipitation in North China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University.
- 段婧, 毛节奏. 2008. 华北地区气溶胶对区域降水的影响 [J]. *科学通报*, 53 (23): 2947–2955. Duan Jing, Mao Jietai. 2008. Effect of aerosol to the regional precipitation in North China [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 53 (23): 2947–2955.
- Dusek U, Frank G P, Hildebrandt L, et al. 2006. Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles [J]. *Science*, 312 (5778): 1375–1378.
- 房文. 2008. 气溶胶对云和降水影响的研究 [D]. 南京信息工程大学博士研究生学位论文. Fang Wen. 2008. Effect of aerosol on cloud and precipitation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 龚道溢, 郭栋, 罗勇. 2006. 中国夏季日降水频次的周末效应 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (3): 1673–1719. Gong Daoyi, Guo Dong, Luo Yong. 2006. Weekend effect of daily precipitation frequency in summer of china [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2 (3): 1673–1719.
- Gong D Y, Guo D, Ho C H. 2006. Weekend effect in diurnal temperature range in China: Opposite signals between winter and summer [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D18113, doi: 10.1029/2006JD007068.
- Gong D Y, Ho C H, Chen D L, et al. 2007. Weekly cycle of aerosol-meteorology interaction over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D22202, doi: 10.1029/2007JD008888.
- Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 黄嘉佑. 2007. 气象统计分析与预报方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社. Huang Jiayou. 2007. *Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Method*. 3rd ed. (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 黄美元, 徐华英. 1999. 云和降水物理 [M]. 北京: 科学出版社. Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1999. *Physics of Cloud and Precipitation* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Koren I, Kaufman Y J, Remer L A, et al. 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation [J]. *Science*, 303 (5662): 1342–1345.
- Liu D M, Huang J, Gao S P, et al. 2006. The pollution level and influencing factors of atmospheric particulates from traffic in Beijing city during spring [J]. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 228–233.
- Miller R C. 1967. Note on analysis and severe storm forecasting procedures of the Military Weather Warning Center [R]. AWS Tech. Rep. 200, U. S. Air Force, Scott Air Force Base, Ill., 94 pp
- Nicholson G. 1969. Wet Thursdays [J]. *Weather*, 24: 117–119.
- Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D00K02, doi: 10.1029/2008JD011575.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294 (5549): 2119–2124.
- Schultz D M, Mikkonen S, Laaksonen A, et al. 2007. Weekly precipitation

- cycles? Lack of evidence from United States surface stations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L22815, doi: 10.1029/2007GL031889.
- Simmonds I, Kaval J. 1986. Day-of-the week variation of rainfall and maximum temperature in Melbourne, Australia [J]. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol.*, Ser. B, 36 (3–4): 317–330.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 2006. 大气环境化学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社. Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. 2006. *Atmospheric Environmental Chemistry*. 2nd ed. (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press.
- Walshaw C D, Rodgers C D. 1964. A problem in rainfall statistics [J]. *Weather*, 19: 132–133.
- 魏凤英. 2009. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社. Wei Fengying. 2009. *Modern Diagnosis and Prediction of Climate Statistics*. 2nd ed. (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Wilks D S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [M]. California: Academic Press.
- Zhao C S, Tie X X, Lin Y P, et al. 2006. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L11814, doi: 10.1029/2006GL025959.