

孙激. 2011. 北京城区与郊区雷暴气候特征及其变化对比分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 649–656. Sun Wei. 2011. Comparison analyses of climate characteristics of thunderstorm and its variations between urban and rural areas in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 649–656.

北京城区与郊区雷暴气候特征及其变化对比分析

孙激^{1,2,3}

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用1961~2007年北京雷暴资料, 采用气候倾向率、多项式曲线拟合和Morlet小波分析方法, 对北京城区与郊区雷暴气候特征及其变化趋势进行了对比分析。结果表明: 1) 北京地区雷暴具有明显的月和日变化特征, 5月是突增期, 9月是陡减期, 7月为峰值期。2) 初雷日期提前、终雷日期推后和雷暴期延长的趋势, 都以城区最为明显。3) 城区与郊区年雷暴日数有着截然相反的变化趋势。郊区年平均雷暴日数虽多, 但年雷暴日数表现为波动式减少的趋势; 城区年平均雷暴日数虽少, 但年雷暴日数却呈现出波动式增加的趋势。城区雷暴日数增多趋势可能与城区增温效应以及相对湿度 $\geq 85\%$ 的日数增加有关; 郊区雷暴日数减少可能与其相对湿度呈明显的下降趋势有关。4) 城区与郊区年雷暴日数的变化具有多重周期性, 其中16~18年的长周期和3~5年的短周期特别明显。

关键词 北京 雷暴 城市化效应 曲线拟合 Morlet小波分析

文章编号 1006-9585 (2011) 05-0649-08 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Comparison Analyses of Climate Characteristics of Thunderstorm and Its Variations between Urban and Rural Areas in Beijing

SUN Wei^{1,2,3}

1 College of Atmospheric, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Using thunderstorm data from 1961 to 2007 in Beijing, statistical of tendency rate, polynomial curve fitting, and Morlet wavelet method, comparison analyses of the climate characteristics of thunderstorm and the trend of climate change were given. The results show that: 1) Thunderstorm occurring from March to November had obvious monthly variation and daily variation, which increased abruptly in May, decreased abruptly in September, and reached maximum in July. 2) In contrast to the rural area, the urban area had more obvious phenomenon that the first day of thunderstorm advanced, the terminal day of thunderstorm delayed, and the period of thunderstorm extended. 3) Annual average days of thunderstorm in the urban area had an extreme opposite variation tendency to the rural area. Although more annual average days of thunderstorm occurred in the rural area, it decreased in a fluctuating tendency. And although less annual average days of thunderstorm occurred in the urban area, it in-

收稿日期 2010-01-25 收到, 2011-08-01 收到修定稿

作者简介 孙激, 男, 1989年出生, 硕士研究生, 研究方向为气候模式模拟与评估。E-mail: sunweinuist@hotmail.com

creased in a fluctuating tendency. The increment tendency of annual average days of thunderstorm in urban area was possibly related to greenhouse effect and the increment of days on which relative humidity $\geq 85\%$. The decrement tendency of annual average days of thunderstorm in the rural area is possibly related to the evident decrement of relative humidity. 4) The variations of annual average days of thunderstorm had multiple period oscillations in both the urban and rural areas, among which 16 - 18-year and 3 - 5-year period oscillations were especially obvious.

Key words Beijing, thunderstorm, urbanization effect, curve fitting, Morlet wavelet method

1 引言

雷暴常伴有大风、强降水或冰雹,是一种常见的灾害性天气现象和高影响天气气候事件,它给工农业生产和人民生命安全带来不利影响甚至是严重损害,被确定为“联合国国际减灾十年”公布的 10 种最严重的自然灾害之一(王昂生, 1991)。因此深入研究雷暴天气的气候特征及其变化,对进一步做好雷暴预警和防灾工作具有重要意义。

研究表明,雷暴天气具有明显的地方性特点,也表现出受人类活动影响的特征(Bornstein and Lin, 2000)。对于我国其他地区雷暴气候特征及其变化,国内学者做过研究并取得了较好的结果。胡玲等(2009)采用气候倾向率、绝对变率、滑动 t 检验方法,统计分析了青海高原雷暴气候特征及其变化趋势,指出该地区雷暴初日表现为显著推后趋势,雷暴终日为显著提前趋势,雷暴期在缩短。高留喜等(2007)分析了山东省雷暴时空变化特征,揭示出该区域雷暴年际变化呈现明显的波动下降的特点。辛吉武等(2008)通过多年雷暴资料对海南儋州雷暴天气气候特征进行了分析,并统计出 5 类雷暴天气影响系统。王成等(2009)通过数理统计、小波分析方法,得出了开平市雷暴天气的气候变化特征。冯建英等(2007)用二阶正交函数和小波方法分析了西北地区雷暴活动的时空分布特征,发现了雷暴随时间变化的 3 种类型。张敏锋和冯霞(1998)利用我国 30 年历年雷暴日资料,采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)和主值函数分析方法,对我国年平均雷暴日的时空分布特征及其异常变化进行了研究。对于城区雷暴气候的分析,李明华等(2007)分析了 1954~2006 年惠州城区

雷暴的气候统计特征。对于北京地区的雷暴(电),郭虎等(2008)对北京市自然雷电和雷电灾害的时空分布特征进行了对比分析。丁青兰等(2007)对北京地区近 12 年暖季(5~9 月)雷暴、冰雹、暴雨和大风等各种对流天气进行了气候统计和分析。廖晓农(2009)对北京雷暴大风日环境特征进行了分析。秦丽等(2006)对北京地区雷暴大风的天气—气候学特征进行了研究。这些工作多以雷电或强对流天气时空分布和环境特征为重点,较少涉及雷暴时间变化趋势的分析,对北京雷暴尤其是城区与郊区的对比及其变化的研究还比较少见。本文利用 1961~2007 年北京雷暴资料,对比分析了北京城区与郊区雷暴时空特征及其变化趋势。

2 资料与方法

在研究北京城市气候问题时,对于测站的选取,李兴荣等(2007)将海淀作为 3 个城区站之一。张立杰等(2009)指出北京夏季盛行偏南风,大兴、海淀和昌平 3 站分布符合从南到北且横跨城区的条件:大兴位于城区上风向,海淀位于城区,昌平则位于城区的下风向。这 3 站的气象要素时间序列很可能包含了城市化的信息,并使用上述 3 站资料探讨了城市化对北京地区夏季降水的影响。因此本文使用沙河(位于昌平,代表郊区)、西郊(位于海淀,代表城区)(如图 1 所示)雷暴资料,对 1961~2007 年北京城区和郊区雷暴气候特征及变化进行对比分析。

在资料统计时做如下规定:只出现闪电不计作雷暴日,各站雷暴日数单独统计,将每年初雷日至终雷日之间定为雷暴期。

尽管降水、暴雨和雷暴时间序列的变化趋势是非线性的,但为了问题讨论的直观性,本文首

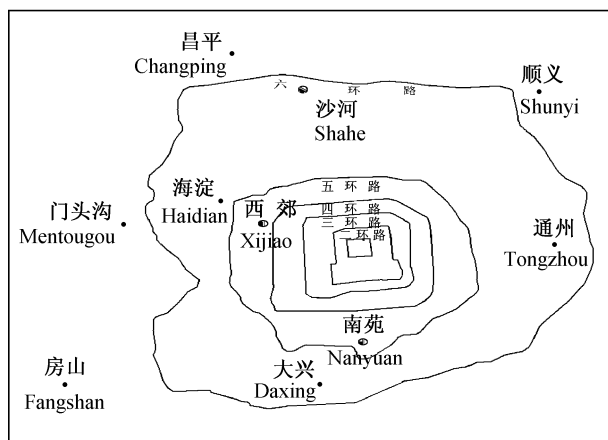


图1 北京城区、郊区站点分布
 Fig. 1 The location of urban and rural stations in Beijing

先采用线性拟合得出的气候倾向率来讨论雷暴的平均变化趋势(谢庄和王桂田, 1994; 杨金虎等, 2008; 王萃萃和翟盘茂, 2009)。此外, 还采用多项式曲线拟合方法分析了雷暴变化趋势的具体情况和阶段性特征。

对于给定的 n 对观测数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 用 $m-1$ 次多项式

$$p(x) = b_1 + b_2x + \dots + b_mx^{m-1}, (m < n) \quad (1)$$

进行曲线拟合。按照最小二乘法原理, 拟合曲线的要求应满足

$$\sum_{i=1}^n [p(x) - y_i]^2$$

最小。当 $n=1$ 时, 为线性拟合。对于北京地区雷暴天气而言, $n=2 \sim 5$ 时, 它们的拟合曲线接近重合, 表现为波动振幅很弱的单峰(谷)形态, 无法反映出雷暴天气气候变化的波动性和阶段性特征; 当 $n=6$ 时, 拟合曲线可以反映出这两种状态。因此, 选用 6 次多项式曲线来分析雷暴天气气候变化的具体情况。

Morlet 小波分析具有多分辨率分析的特点, 它优于传统的 Fourier 分析, 近年来广泛应用于多尺度气候分析研究(廖雪萍等, 2007; 胡玲等, 2009), 并取得了较好的效果。Morlet 小波(实部)变化系数的大小代表某一尺度波动振幅的大小, 反映它所对应时段时间尺度的周期性是否显著, 小波系数正负分别表示该时段要素为偏多期和偏少期, 小波系数零值线对应要素气候突变(转折)期。

3 结果及讨论

3.1 雷暴的日变化特征

城区与郊区雷暴均存在明显的日变化特征(图略)。总体来说, 雷暴午后开始增多, 傍晚前后达到高峰。若以雷暴出现次数大于 70% 为界, 集中出现在 16~23 时(北京时间, 下同), 极大值出现在 19 时, 若以雷暴出现次数小于 20% 为界, 在 07~12 时雷暴次数较少, 极小值出现在 11 时。

雷暴连续出现日数城区平均为 4.23 d, 郊区平均为 4.58 d, 已超过人们“雷打三日”的概念。最长连续日数郊区达到 12 d, 城区达到 8 d。计算郊区、城区雷暴连续日气候倾向率, 分别为 0.113、0.066, 表明近 47 年来城区与郊区雷暴连续出现日数均有增加的趋势, 其中郊区增加趋势较城区明显, 6 阶多项式曲线拟合表明(图略), 2000 年后郊区雷暴连续出现日数开始大幅增加。而此阶段北京的北部地区处于快速城市化阶段(郑思轶和刘树华, 2008; 张立杰等, 2009)。

3.2 雷暴的月、季变化特征

分析表 1 可知, 城区与郊区雷暴月平均分布特征基本相同, 雷暴出现在 3~11 月, 春、夏季转换的 5 月和夏、秋季转换的 9 月分别是雷暴的突增期和陡减期。5~9 月雷暴日数约占总数的 96%; 6~8 月约占 76%; 7 月达到峰值, 平均可达 10 d, 约占全年总数的 29%。

表 1 1961~2007 年北京月平均雷暴日数
 Table 1 Monthly mean days of thunderstorm from 1961 to 2007 in Beijing d

	郊区	城区
3 月	0.02	0.02
4 月	0.93	1.11
5 月	3.45	3.47
6 月	8.75	8.34
7 月	10.59	10.13
8 月	8.59	8.02
9 月	3.68	3.40
10 月	0.59	0.72
11 月	0.05	0.06

3.3 初雷日、终雷日和雷暴期变化特征

雷暴初雷日城区平均为 4 月 26 日, 郊区略晚, 为 4 月 28 日。初雷日最早为 2002 年 3 月 29 日 (城区), 最晚为 1990 年 6 月 1 日 (郊区)。雷暴终雷日郊区平均为 10 月 2 日, 略早于城区 (10 月 5 日)。终雷日最早为 1975 年 8 月 11 日 (城区), 最晚为 2004 年 11 月 9 日, 城区与郊区同时出现。

计算雷暴初雷日期和终雷日期气候倾向率, 城区初雷日期提前和终雷日期推后的趋势都强于郊区。城区平均每 10 年分别提前 3.7 d 和推后 3.9 d, 郊区平均每 10 年分别提前 2.1 d 和推后 2.4 d。参照郑思轶和刘树华 (2008) 采用的北京城市化进程阶段划分和对比分析方法, 做 6 次多项式曲线 (图略) 可知, 雷暴初雷日期提前和终雷日期推后的趋势从 20 世纪 70 年代末至 80 年代初开始, 到 2000 年后逐渐显现。这一时间阶段与北京快速城市化阶段相吻合, 可能受城市化进程一定程度影响。

城区雷暴期天数长于郊区。城区年平均为 163 d, 郊区为 158 d。城区最长年达 212 d (2004 年), 最短年为 92 d (1975 年), 两者相差 120 d。郊区最长年为 212 d (2004 年), 最短年为 115 d (1966 年和 1995 年)。2004 年是值得关注的一年, 由于城区和郊区的终雷日期均为近 47 年中最晚的年份, 使得该年成为雷暴期最长的年份, 达到 212 d。由图 2a 可知, 城区与郊区雷暴期都有延长的趋势, 但城区的延长趋势明显大于郊区, 它们的气候倾向率分别为 0.8484 和 0.4399, 这与初雷、终

雷日期的变化趋势是吻合的。这种趋势也是从 80 年代初开始, 到 2000 年后逐渐显现。图 2b 是雷暴期 6 次多项式曲线, 从中可以看出城区与郊区雷暴期均呈波动式上升, 但雷暴期天数的多寡具有阶段性特征, 值得关注的是郊区站的年变化在 1981 年前及 2005 年后, 与城区站有着不一样的变化形式。1961~1981 年郊区表现持续的缓慢上升, 而城区却经历了 1967 年前的先升后降及 1967~1981 年的先降后升, 这样一种峰、谷转换阶段。1981~2005 年城区、郊区变化趋势趋同。2005 年后, 这种差异又开始出现。值得注意的是北京城区与郊区初雷日期呈现的提前趋势、终雷日期呈现的推后趋势及雷暴期的延长趋势与青海高原雷暴初日表现为显著推后趋势, 雷暴终日为显著提前趋势, 雷暴期缩短有着完全相反的变化趋势。

3.4 雷暴的年际变化特征

从 47 年年平均统计来看, 北京年平均雷暴日数城区为 35.3 d, 郊区为 37.0 d, 郊区多于城区。城区年雷暴日数最多为 48.0 d, 最少为 20.0 d; 郊区年雷暴日数最多为 51.0 d, 最少为 21.0 d。

但从年雷暴日数气候倾向率 (郊区为 -0.994, 城区为 0.890) 来看, 城区与郊区年雷暴日数有着相反的变化趋势, 即郊区雷暴日数呈减少的趋势, 而城区呈增加的趋势 (图 3a)。这与北京 1975~2004 年城区与郊区夏季 (6~8 月) 降水量均呈下降趋势有所不同 (张立杰等, 2009)。

采用 6 阶多项式曲线对年雷暴日数变化进行阶段性分析 (图 3b), 发现城区和郊区的年雷暴

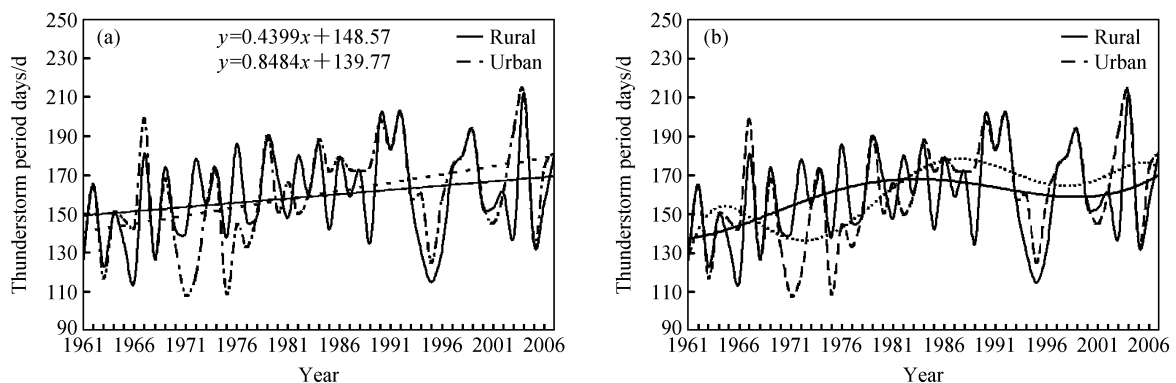


图 2 雷暴期 (a) 天数年变化、气候倾向率及 (b) 6 次多项式曲线

Fig. 2 (a) The annual variations of the days of thunderstorm period and tendency rate, and (b) 6-order polynomial curve fitting

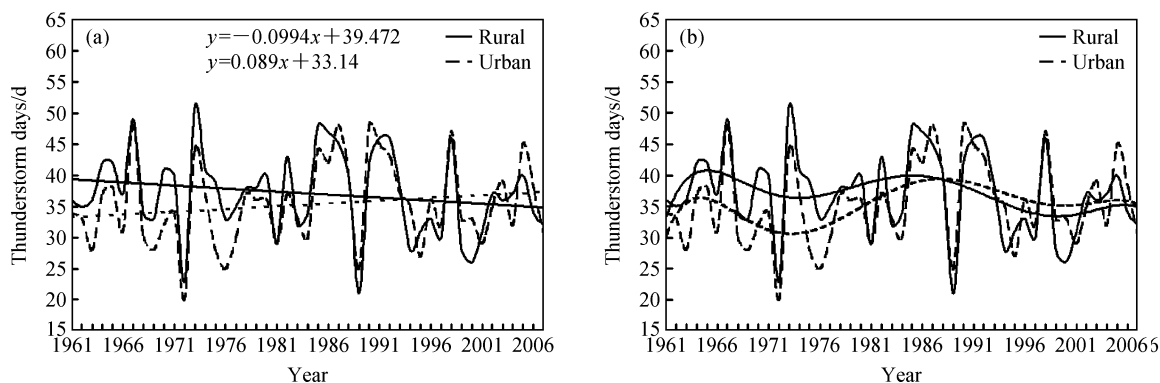


图 3 同图 2, 但为雷暴日数
 Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the thunderstorm days

日数呈波动特征。从总体上来看, 城区表现为波动式的上升, 郊区为波动式的下降, 两者的波峰、波谷有明显的阶段性分布。如 70 年代初至 80 年代末, 城区波动振幅明显大于郊区, 即雷暴日数的绝对增量, 这阶段是城区雷暴日数快速增多的时期; 80 年代末之后, 郊区波动振幅略大于城区, 表明这时期郊区雷暴日数减少比较明显。从 90 年代中后期开始, 城区与郊区间年雷暴日数波动振幅差值随时间缩小, 表明城区与郊区间的年雷暴日数的差异逐渐缩小。对比城区与郊区雷暴日数线性变化趋势 (图 3a), 也表明 1991 年前两者间差距较大, 之后差距有所减小。其原因可能与该时段郊区最高气温上升较城区快, 它们之间的差距缩小 (见图 4) 有一定关系。因为朱乾根等 (2007) 指出夏季午后陆地表面受日射而强烈加热, 常常在近地面层形成绝对不稳定的层结, 使对流容易发展。这种热力抬升作用主要造成“热雷暴”。热力作用的强弱取决于局地加热的程度, 即最高温度的高低。

计算沙河、西郊 1961~2007 年平均气温的平均值, 分别为 11.8 °C 和 12.4 °C, 城区、郊区年平均温度相差 0.6 °C。这与郑思轶和刘树华 (2008) 选用 6 个城区代表站、7 个郊区代表站, 得到的 1961~2004 年北京郊区和城区年平均气温值完全相同。计算年平均气温气候倾向率, 城区和郊区分别为 0.301 和 0.224。可见城区的平均气温不仅高于郊区, 而且增温趋势更明显。

计算年平均相对湿度、相对湿度 ≥ 70% 和相对湿度 ≥ 85% 的年日数变化趋势 (见表 2), 发现

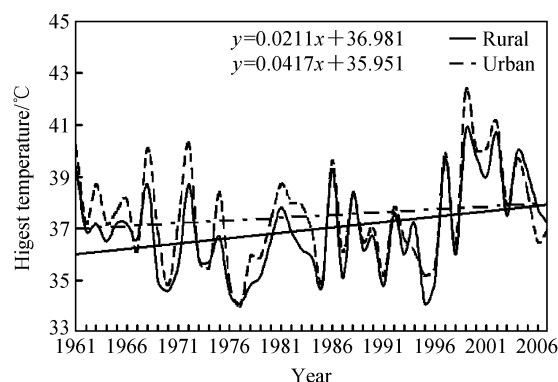


图 4 最高气温年变化及其线性趋势
 Fig. 4 Annual variations of the highest temperature and its linear tendency

城区与郊区年平均相对湿度和相对湿度 ≥ 70% 的日数均呈下降趋势, 但两者都是郊区下降趋势更加明显, 达到城区的 2 倍多。但相对湿度 ≥ 85% 的日数郊区每 10 年下降 3.01 d, 而城区却是每 10 年增加 0.63 d (见图 5)。

表 2 北京城区与郊区各要素的气候倾向率
 Table 2 Climatic tendency rate of the various factors in urban and rural areas

	雷暴日数	年平均 相对湿度	相对湿度 ≥ 70% 日数	相对湿度 ≥ 85% 日数
郊区	-0.994	-1.178	-5.698	-3.01
城区	0.890	-0.380	-2.100	0.63

按照朱乾根等 (2007) 给出的总能量 (总温度) 公式:

$$T_t = \frac{E_t}{c_p} \approx T_\sigma = T + 2.5q + 10Z, \quad (2)$$

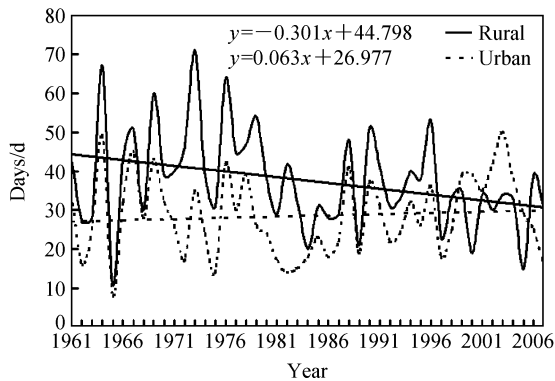
图5 相对湿度 $\geq 85\%$ 日数趋势线及气候倾向率

Fig. 5 The trend and climatic tendency rate of the days on which the relative humidity $\geq 85\%$

其中, T_t 为总温度, E_t 为总能量, c_p 为比定压热容, T_s 为湿静力总温度, T 为观测到的温度, q 为比湿, Z 为海平面高度。

丁一汇(1989)给出的相对湿度

$$R_H \approx \frac{q}{q_s} \times 100\%, \quad (3)$$

其中 q_s 为饱和比湿。

由公式(3)和公式(4)可知,地面总能量的大小与当地气温的高低和相对湿度的大小成正比。此外,朱乾根等(2007)指出,雷暴所产生的天气现象叫做“对流性天气”。对流性天气形成的基本条件为水汽条件、不稳定层结条件和抬升力条件。其中水汽条件所起的作用不仅是提供成云致雨的原料,而且它的垂直分布和温度的垂直分布,都是影响稳定度的重要因子。水汽和不稳定层结是发生对流性天气的内因,抬升力条件则是外因。由于城区的平均气温高于郊区且增温趋势更明显以及相对湿度 $\geq 85\%$ 日数城区增加,郊区明显减少,因此城区与郊区相比较,总体上更具有较高的地面总能量和促使雷暴天气发生的内因条件。这有助于解释年雷暴日数郊区减少,城区增加的现象。当然雷暴的气候变化是十分复杂的物理过程,是否还有其它因子会对雷暴的这一变化造成影响,还需今后不断深入地研究。

3.5 雷暴的周期及突变特征

对郊区和城区的年雷暴日数进行 Morlet 小波分析,结果表明郊区(图 6a)和城区(图 6b)小波(实部)变化系数值及形态分布近似。在长时间尺度上,两者都存在 16~18 a 的主周期(60~

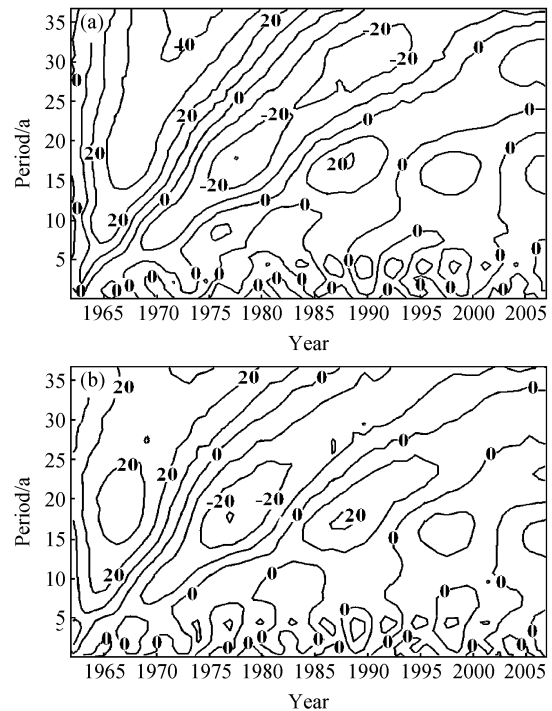


图6 北京(a)郊区和(b)城区年雷暴日数 Morlet 小波分析

Fig. 6 Morlet wavelet analysis for the days of annual thunderstorm days at (a) rural area and (b) urban area

80 年代初周期为 17~18 a, 80 年代初至 2007 年周期为 16~17 a)。郊区还存在一个 30 a 以上的周期。在短时间尺度上,城区和郊区都存在两个次周期:城区 70 年代初之前为 3 a,之后为 4 a、郊区 80 年代初之前为 3 a,之后为 5 a。雷暴年日数突变分析结果显示,城区与郊区突变特征相同。突变年为 1972、1983、1992 和 2002 年。期间它们均经历了 1961~1972 年偏多、1972~1983 年偏少、1983~1992 年偏多、1992~2002 年偏少以及 2002 年后偏多的现象。它们与 6 次多项式拟合曲线的波峰、波谷反映的结果(图 3b)基本一致。这也说明采用 6 次多项式曲线对雷暴的气候变化进行拟合是合理可行的。

4 结论

(1) 北京地区雷暴具有明显的季、月和日变化特征。雷暴可出现在 3~11 月,5 月是突增期,9 月是陡减期,7 月为峰值期。雷暴 70% 出现在 16~23 时,极大值出现在 19 时,07~12 时较少出现。

(2) 北京地区初雷日期提前、终雷日期推后和雷暴期延长的趋势, 都以城区最为明显。初雷日、终雷日平均每 10 年提前和推后约 2~4 d。初雷日期、终雷日期提前和推后趋势出现的时间与北京快速城市化阶段相吻合(郑思轶和刘树华, 2008)。

(3) 北京城区、郊区年平均雷暴日数有着截然相反的变化趋势。郊区年平均雷暴日数虽多, 但年雷暴日数表现为波动式的减少过程; 城区年平均雷暴日数虽少, 但年雷暴日数却呈现出波动式的增加趋势。70 年代初至 80 年代末城区雷暴日数快速增多, 80 年代末之后郊区雷暴日数减少明显, 90 年代开始, 城区、郊区间年雷暴日数的差异逐渐缩小。城区雷暴日数增多的趋势可能与城区年平均气温增高以及相对湿度 $\geq 85\%$ 日数增加有关, 而郊区雷暴日数减少可能与其相对湿度呈明显下降的趋势有关。

(4) 雷暴连续出现日数郊区略多于城区且增加趋势较城区明显。

(5) 北京地区年雷暴日数存在周期性规律。城区与郊区都存在 16~18 a 的长周期和 3~5 a 的短周期变化。突变年为 1972、1983、1992 和 2002 年, 年雷暴日数经历了 1961~1972 年偏多、1972~1983 年偏少、1983~1992 年偏多、1992~2002 年偏少以及 2002 年后偏多的现象。

参考文献 (References)

- Bornstein R, Lin Q. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies [J]. *Atmos. Environ.*, 34: 507-516.
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 45. Ding Yihui. 1989. Diagnostic Analysis Means of Synoptic Dynamics [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 45.
- 丁青兰, 王令, 陈明轩, 等. 2007. 北京地区暖季对流天气的气候特征 [J]. *气象*, 33 (10): 37-44. Ding Qinglan, Wang Ling, Chen Mingxuan, et al. 2007. Climate character analysis of convective weather during warm season (May to September) in Beijing [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 33 (10): 37-44.
- 冯建英, 陈佩璇, 梁东升. 2007. 西北地区雷暴的气候特征及其变化规律 [J]. *甘肃科学学报*, 19 (3): 71-74. Feng Jianying, Chen Peixuan, Liang Dongsheng. 2007. Climatic feature of thunderstorm in northwest of China and its rule of changes [J]. *Journal of Gansu Sciences* (in Chinese), 19 (3): 71-74.
- 高留喜, 杨成芳, 冯桂力, 等. 2007. 山东省雷暴时空变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (4): 239-242. Gao Liuxi, Yang Chengfang, Feng Guili, et al. 2007. Spatial-temporal variations of thunderstorms in Shandong Province [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (4): 239-242.
- 郭虎, 熊亚军, 付宗钰, 等. 2008. 北京市自然雷电与雷电灾害的时空分布 [J]. *气象*, 34 (1): 12-17. Guo Hu, Xiong Yajun, Fu Zongyu, et al. 2008. Temporal-spatial characteristics of lightning activity and lightning disaster over Beijing [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34 (1): 12-17.
- 胡玲, 郭卫东, 王振宇, 等. 2009. 青海高原雷暴气候特征及其变化分析 [J]. *气象*, 35 (11): 64-70. Hu Ling, Guo Weidong, Wang Zhenyu, et al. 2009. Climate characteristics of thunderstorm and its change in Qinghai Plateau [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35 (11): 64-70.
- 李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究 [J]. *气象*, 37 (6): 25-31. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. 2007. Analysis and numerical simulation of summer strong urban heat island in Beijing [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37 (6): 25-31.
- 李中华, 徐奇功, 陈卓礼, 等. 2007. 惠州城区近 50 年来雷暴的气候统计特征 [J]. *广东气象*, 29 (3): 19-21. Li Minghua, Xu Qigong, Chen Zhuoli, et al. 2007. Climatic statistical characteristics of thunderstorm in Huizhou urban in recent 50 years [J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), 29 (3): 19-21.
- 廖雪萍, 覃卫坚, 唐炳莉, 等. 2007. 广西近 50 年暴雨日数变化的小波分析 [J]. *气象*, 33 (12): 39-45. Liao Xueping, Qin Weijian, Tang Bingli, et al. 2007. Wavelet analysis of variation of rainstorm days in Guangxi in recent 50 years [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 33 (12): 39-45.
- 廖晓农. 2009. 北京雷暴大风日环境特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 54-62. Liao Xiaonong. 2009. Analysis on environmental condition for wind gust in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (1): 54-62.
- 秦丽, 李耀东, 高守亭. 2006. 北京地区雷暴大风的天气-气候学特征研究 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 754-762. Qin Li, Li Yaodong, Gao Shouting. 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (6): 754-762.
- 王昂生. 1991. 大气灾害学 [J]. *地球科学进展*, 6 (5): 74-75. Wang Angsheng. 1991. Atmospheric catastrophology [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 6 (5): 74-75.
- 王成, 吴善材, 谢爱琼. 2009. 开平市近 50 年雷暴的气候统计特征 [J]. *广东气象*, 31 (6): 41-42. Wang Cheng, Wu Shancai, Xie Aiqiong. 2009. Climatic statistical characteristics of thunderstorm in Kaiping in recent 50 years [J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), 31 (6): 41-42.
- 王萃萃, 翟盘茂. 2009. 中国大城市极端强降水事件的初步分析

- [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 553-560. Wang Cuicui, Zhai Panmao. 2009. Changes of precipitation extremes in China's large cities [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 553-560.
- 谢庄, 王桂田. 1994. 北京地区气温和降水百年变化规律的探讨 [J]. 大气科学, 18 (6): 683-690. Xie Zhuang, Wang Guitian. 1994. The changes of temperature and precipitation in Beijing during last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (6): 683-690.
- 辛吉武, 许向春, 蔡杏尧, 等. 2008. 海南儋州雷暴天气气候特征分析 [J]. 气象, 34 (1): 100-106. Xin Jiwu, Xu Xiangchuan, Cai Xingyao, et al. 2008. Climatic and synoptic characteristics of thunderstorm in Danzhou of Hainan Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (1): 100-106.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 75-83. Yang Jinhui, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 75-83.
- 张敏锋, 冯霞. 1998. 我国雷暴天气的气候特征 [J]. 热带气象学报, 14 (2): 156-162. Zhang Minfeng, Feng Xia. 1998. Climatic characteristics of thunderstorm weather in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (2): 156-162.
- 张立杰, 胡天洁, 胡非, 等. 2009. 近 30 年北京夏季降水演变的城郊对比 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 63-68. Zhang Lijie, Hu Tianjie, Hu Fei, et al. 2009. Comparison of summer precipitation evolution over the last 30 years between urban and rural region of Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 63-68.
- 郑思轶, 刘树华. 2008. 北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 123-133. Zheng Siyi, Liu Shuhua. 2008. Urbanization effect on climate in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 123-133.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 426-445. Zhu Qiagen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Synoptic Meteorology Principle and Means [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 426-445.