热带气旋背景条件下的城市效应与广州夏季雷暴

蒙伟光^{00*} 闫敬华⁰ 扈海波²

(① 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080;② 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089;③ 中国 气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

摘要 利用广州地区中尺度自动气象站观测网资料、广州雷达回波资料以及卫星 *T_{BB}* 资料等, 分析了 2005 年 8 月初受热带气旋外围气流影响条件下广州地区"城市热岛"(UHI)的演变特征,并 主要对期间 8 月 4 日夜间和 7 日午后发生在广州城区的两次雷暴过程及其与 UHI 等城市效应的 关系进行了研究.结果发现两次雷暴的形成均与 UHI 相关, UHI 引起局地气流发生辐合并引发对 流发展,对流降水发生的时间和位置均与 UHI 的演变及其相应的辐合区有良好对应关系,对流易 于在 UHI 发展较强的时段和位置上发生.而且受城市的影响,两次雷暴在移动经过广州城区时均 得到了进一步发展,最强的对流回波出现在中心城区上空,降水也集中落在中心城区.所有这些 特征表明两次雷暴的形成和发展均与城市的影响有关.

关键词 夏季雷暴 城市热岛 城市效应 热带气旋

随着城市化的快速发展和城市人口日益增多, 城市对局地天气影响问题受到了人们的重视."城市 热岛"(UHI)是城市对天气影响的最直接表现^[1], UHI 不仅改变了城区附近的温度分布,影响到城区的边 界层结构,还通过改变局地环流,使城区及其附近对 流天气的形成和发展也受到了影响.较早的研究就 有发现,由于城市区的不断扩大,一些大城市及其附 近地区降水的分布、雷暴雨发生的频数和强度都发生 了改变^[2,3].

关于城市对天气影响问题的认识多数来自于观测研究,20世纪70年代以来,发达国家曾相继在一些中心城市区开展了外场观测试验对此加以研究.例如在美国,曾先后在圣路易斯(St. Louis)、亚特兰大(Atlanta)以及休斯敦(Houston)等大城市区开展过此类的观测研究.20世纪70年代中期在圣路易斯地区开展的 METROMEX(Metropolitan Meteorological

Experiment)试验是其中一次比较全面考察了城市对 夏季降水和雷暴天气影响问题的外场观测试验[4].研 究结果表明, 该地区受城市影响导致的夏季降水增 多主要集中位于城区或城区下风方向的 50~75 km 左 右, 增加量可达 5%~25%, 而且在这些地区, 雷暴发 生频率的增加可达到 40%, 持续的时间也增长 [5.6]. 研究还指出城区对流降水增强的现象多数是由于热 岛效应引起局地气流发生辐合造成的, 尤其在环境 流场比较弱的情况下, 与热岛相关的城市辐合区往 往可以触发对流发展,此时城区上空可观测到最强 的对流回波. 城区下风方向对流降水的增强则主要 是由于移动性雷暴受到城市建筑物阻挡作用而引起. 尽管城市建筑物的摩擦阻挡作用也可引起城市辐合 区的增强,从而对城区对流的发展也有贡献,但其阻 挡作用往往还可以引起移动性雷暴回波发生分裂并 沿着城市的外围向下游移动,此时最强的雷达回波

收稿日期: 2007-04-29; 接受日期: 2007-07-20

科技部基础条件平台项目(编号: 2003DIB4J145)、城市气象科学研究基金(编号: UMRF200504)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验 室开放课题

^{*} E-mail: wgmeng@grmc.gov.cn

并不是出现在城市区上空, 而是出现在城市的两侧 及其下游地区^[6,7].

数值模拟研究结果是认识城市影响问题的另一种重要来源.应用二维的数值模式,Baik 等^[8]曾模拟研究了UHI对干、湿对流的影响问题,证实热岛的作用可以改变对流边界层的结构和局地环流,从而对对流的发展产生影响.近年来,随着城市参数化方案(城市冠层模式)的发展及其在中尺度数值模式的耦合应用^[9,10],采用三维的中尺度数值模式模拟城市对中尺度环流的影响已成为可能,一些针对实际雷暴个例的敏感性数值模拟试验可以更具体地解释城市对天气产生影响的过程^[11,12].

20世纪80年代以来,中国经历了一个城市化建 设的快速发展过程,由此而引起的主要大城市(群)区 的气候变化已引起人们的关注,不少工作对诸如北 京、上海等大城市区对天气气候的可能影响也开展了 研究[13~15]. 有分析结果表明,近 30 年来北京城区降 水量与郊区相比有增加的趋势[13]; Chen 等[15] 针对上 海地区的观测研究也发现,随着长江三角洲城市群 的发展, 气温在迅速变暖, 表现为一个由长江三角洲 中心城市联合而成的"区域性热岛",降水量也呈现出 增加的趋势.除了从气候平均态的角度开展研究之 外,近年来已有一些工作开始关注到城市对局地天 气事件的影响问题, 如孙继松等[16]曾研究了城市边 界层过程对北京地区一次局地暴雨的影响,指出城 市与郊区下垫面物理属性造成的热力差异,影响到 了城市中尺度低空风场辐合线的形成,而且它的存 在对对流单体还具有明显的组织作用. 但尽管如此, 目前国内外关于城市对局地对流降水过程影响的研 究仍比较少见,已有的一些研究结果也仅是局限于 几个特定的城市,在不同地区和不同环境条件下开 展更加广泛的观测分析和模拟研究很有必要.

珠江三角洲包括广州等沿海岸带城市群区是我 国城市化发展最迅猛的地区之一,现有的研究表明 这一地区的 UHI 效应日益突出^{117]},夏季高温频繁出 现.尤其是在受到热带气旋外围下沉气流影响条件 下,城市高温天气更显突出,期间的对流活动也有增 强的趋势.这一地区城市的发展是否也对这些对流 天气产生什么影响,值得研究.本文选取 2005 年 8 月 初在受到热带气旋外围气流影响条件下两次主要影 响广州市的雷暴过程进行分析,试图了解在这种背 景条件下雷暴形成于城市及其附近地区的主要特征, 并揭示 UHI 及其它城市效应对雷暴雨天气产生影响的过程,这对于观测事实的认识,对进一步应用数值模拟方法开展更加深入的研究十分必要.

1 数据及分析方法

使用的数据除了卫星 Tbb 资料和 NCEP-FNL 再分析资料外,主要的数据来自广州地区的中尺度自动气象站观测资料以及广州雷达回波资料.目前,广州地区的中尺度自动气象站观测网可 6 min 提供一次观测资料,分析中主要采集了从 2005 年 8 月 2 日~9日期间每半小时的观测数据,在使用中对数据进行了简单的质量控制, 剔除了有明显错误的纪录.

为了在分析区域更好地描述 UHI、降水以及散度 场和流场的分布变化特征,采用 Cressman 客观分析 方法,把自动气象站观测网的温度、风和降水等资料 插值到格距为约 5 km(0.045°)的网格上进行分析,地 面散度场由格点上的风速计算得到,流场的绘制也 是基于格点风场的分布.来自广州多普勒雷达的回 波资料被重新插值到分辨率为2 km 网格上后进行分 析,主要用于描述城市区对流的发展情况.

2 分析结果

2.1 2005 年 8 月初天气概况及广州地区"城市热岛"强度的演变

2005 年 8 月初,由于受副热带高压控制和热带 气旋"麦莎"外围下沉气流的影响, 广东省大部地区普 遍出现了高温,期间的4日夜间到5日凌晨以及7日 午后广州城区分别出现了两次短时的雷暴天气. 图 1 分别给出了这两次雷暴发生前地面及高空 500 hPa 等 压面的形势图,4日08时(北京时,下同)地面图上(图 1(a)), 台风"麦莎"位于台湾岛东南部的海面上, 受其 环流影响,大部分时间华南地区主要受偏北气流影 响,图1(b)是由NCEP-FNL资料给出的广州第一次雷 暴发生前 2 h(4 日 20 时)500 hPa 上的环流形势, 可以 看到偏北气流控制了华南大部并主要盛行下沉运动. 6 日凌晨"麦莎"登陆浙江,对华东等地造成影响,到 了7日08时(图1(c))后"麦莎"已移到长江口附近,图 1(d)是相应时刻 NCEP-FNL 资料给出的 500 hPa 环流 形势, 华南转为受台风低压槽后部偏北气流影响. 由 于普遍受到下沉气流影响,尽管在这期间华南大部 地区都具有较高的对流不稳定能量,如图上表明4日 20 时华南一带的对流有效位能 CAPE 值已普遍达

第 37 卷



图 1 雷暴发生前地面及高空 500 hPa 等压面形势分析

地面图来自香港天文台 08 时的实况分析, (a) 4 日 08 时; (c) 7 日 08 时;高空形势由 NCEP-FNL 再分析资料绘制得到; (b) 4 日 20 时; (d) 7 日 08 时.图 中阴影区为垂直运动(单位: Pa·s⁻¹),等值线为对流有效位能 CAPE(单位: J·kg⁻¹)

到 2000 J·kg⁻¹以上,7日08时的 CAPE 值也在 1000 J·kg⁻¹ 左右,但缺乏了触发机制,大范围的对流并没 有发展起来.华南尤其是广州及附近地区大部分时 间主要以高温天气为主,广州市从8月2日起连续多 日录得 35℃以上的温度,最高时的温度超过 36℃. 在这种高温影响的背景条件下,4日夜间以及7日午 后分别在广州城区出现的两次短时雷雨天气过程, 可能是受到城市的影响造成的.

图 2 给出了日本 MTSAT 卫星云图 Tbb 资料反映 的雷暴云团的发展演变, 雷暴云团主要集中形成于 城区上空的特征某种程度上可以说明城市的这种影 响. 4 日夜间雷暴云团主要从广州城区北边发展并向 南扩展, 22 时开始发展起来后 Tbb 温度小于-52℃的 面积持续扩大, -62℃的对流云区在 23 时和随后的 00 时均主要位于广州城区上空, 其范围最大时达到了 80 km×60 km 左右, 呈椭圆形结构, 说明雷暴在影响 广州城区时发展最强(图 2(a)). 实际降水纪录表明此 次雷暴过程雨量达到了 93.2 mm,降水强度最大时达 到 68 mm·h⁻¹.7 日午后的雷暴 14 时后形成于广州城 区的西边,开始时范围较小,15 时雷暴云团东移影响 广州城区,至16 时云团范围扩大,但比起4日的雷暴 云团范围要小,-62℃的对流云区仅为 60 km×30 km 左右,并呈东北西南的带状结构(图 2(b)).相应的过 程雨量也要小一些,最大总雨量仅为 57.0 mm,最大 降水强度为 20 mm·h⁻¹.16 时之后这一雷暴云团逐渐 减弱并向北收缩,此时其东侧又有新的对流云团发 展,并于 17 和 18 时发展得较强,但由于这一新的对 流云团形成于城区的下风方向,对中心城区没有造 成影响.

图3分别给出了两次雷暴过程3h总雨量的分布, 图中灰色填充区表示广州及其附近的城市区,雨量 等值线由自动站雨量观测插值到5km间隔网格后绘 制而成.由图可以清楚地看到,两次雷暴过程的降水 主要落在广州城区,局地特征非常明显.



(a) 8 月 4 日 22 时~5 日 00 时总雨量分析; (b) 8 月 7 日 14~16 时总雨量分析. 灰色填充区为城市土地利用类型区域,雨量等值线间隔 10 mm

对流在城区得以发展往往与城市的热岛效应有 关,尤其就这两次雷暴过程来说,由于受热带气旋外 围气流影响,环境大气已具备较高的不稳定能量,由 热岛引起的低层辐合可为对流的发展提供很好的触 发机制.为考察热岛的影响我们分析了广州城区和 郊区温度的变化特征. 图 4 给出了 8 月 2~9 日广州城 区与郊区温度的对比,城区温度用位于广州市内的 自动站 G1001(113°19′, 23°08′,即图 3 中广州的位置) 纪录作代表,郊区温度用位于广州东面增城辖区内 的自动站 G1023(113°43′, 23°10′,也即图 3 中增城的



图 4 2005 年 8 月 2~9 日广州地区"城市热岛"的演变情况 (a) 城区和郊区温度的演变,实线为城区,虚线代表郊区;(b) 热岛强度和降水的变化,均由每半小时的自动站记录绘制而成

位置)纪录作代表,两地相距约 50 km. 热岛强度由城 区与郊区的温差表示,可以看到期间广州地区的热 岛特征明显,强度普遍超过了 2℃(图 4(b)),主要出现 在夜间到次日的早晨,而日间的热岛强度较弱. 夜间 雷暴发生在热岛强度发展最强的时候,如 4 日夜间从 19 时开始到雷暴发生前的 22 时左右,热岛强度曾一 度迅速从不到 1℃上升到了 3℃以上,结果雷暴开始 发展并影响广州,自动站 G1001 从 4 日 22 时开始纪 录到降水,23 时记录到的半小时雨量达到了 64 mm.

7 日午后雷暴发生时城区从 14 时左右开始纪录 到降水,到 16 时已基本结束.由于雷暴发生在午后, 此时热岛强度显得比较弱,但值得注意的是在雷暴 发生前一日的夜间及当日凌晨也观测到了较强的热 岛强度,凌晨1时的温差甚至达到了3.8℃,是连日来 的最强记录.热岛强度在日间较弱而在夜间发展最 强这一特征与以往的研究结果是一致的^[4],但需指出 的是,热岛在日间强度较弱的特征在这里表现得更 明显,大部分时间城区的温度甚至低于郊区,这是否 反映了广州城市对温度产生影响的一种特征仍需作 进一步的分析. 以上的分析结果表明,在受热带气旋外围气流 和高温天气影响背景条件下,广州城区发生的这两 次雷暴雨过程与城市的影响可能有关.以下对城市 的这种影响及其所表现出来的特征作更详细的分析, 并就热岛影响雷暴形成的物理机制作进一步的探讨.

2.2 8月4日的夜间雷暴

前面指出 8 月 4 日夜间的雷暴开始时形成于广州 城区的北面, 22 时以后影响广州中心城区. 图 5(a)给 出了雷暴形成前的 4 日 21 时由自动站观测网观测到 的地面温度分析. 尽管已到了夜间, 但城市及其附近 地区的温度仍普遍较高, 城区多数地方温度在 32℃ 以上, 最高值超过 33℃, 比郊区的温度高出近 3℃. 如用 32℃等温线来表示热岛范围的话, 可以看到广 州地区 UHI 特征十分明显, 主要位于城区的西侧, 并 呈东北西南走向分布. 城区偏北和东北一侧小范围 的冷区, 可能与位于广州市东北面白云山(山高 380 多米)的影响有关.

为了清楚地表示热岛与其所引起的低层气流辐 合的关系,图 5(b)中给出的是相应此时的地面流场和



(a) 4 日 21 时地面温度分析(℃); (b) 4 日 21 时地面流场和散度场分析(×10⁻⁴ s⁻¹); (c) 21 时 30 分的雷达回波(填色区, dBz)和 22 时的 1 h 降雨量(mm); (d) 22 时 30 分的雷达回波(填色区, dBz)和 23 时的 1 h 降雨量(mm)

散度场的分布.可以看到在热岛范围内有这么几个 明显的气流辐合区,其散度值都较大,达到-2×10⁻⁴ s^{-1} 以上,最大的中心值超过-4×10⁻⁴ s^{-1} .其中的一 个位于广州城区的西到西南一侧, 与东北西南走向 的热岛对应很好, 辐合区也呈东北西南的带状结构, 由分别来自南北两个方向的两支气流辐合形成.南 侧的气流主要来自珠江口及其西侧沿海一带,另一 个辐合区位于广州城区和热岛的北面,除了与热岛 的效应有关之外,由于其位置正好是处于广州市东 北面白云山的西北侧, 与这里的地形影响可能也有 关. 当然, 热岛附近的这种气流辐合, 与城市区地表 面较大的粗糙度和建筑物的阻挡作用也会有关, 尤 其是迎风一面的城区南侧,城市地表的摩擦会有更 大的作用. 例如位于广州城区南侧与番禺区之间的 辐合区, 主要由偏南气流的风速辐合引起, 更多地可 能是由于这种摩擦阻挡作用造成.

与热岛相关的辐合流场十分有利于对流的形成 和发展.一方面是辐合有利于上升运动的发展,另一 方面热岛的加热作用还可影响低层大气使其变得不 稳定.由于广州无探空观测资料,我们利用 NCEP-FNL资料计算的一些物理量参数来描述广州 城区雷暴发生前环境条件的变化.计算的对流有效 位能(CAPE)表明, 8月4日从08时到雷暴发生前的 20 时广州上空的 CAPE 值由 1059 J·kg⁻¹ 上升至 2326 J·kg⁻¹, K 指数由原来的 32.1°K 上升至 35.7°K, 抬升 指数也由-2.8°K 升高到-5.3°K, 这些都说明广州城 区附近大气已变得很不稳定. 但由于低层缺乏对流 发展的触发机制,到此时对流都没能发展起来.4 日 21 时之后雷暴之所以得到发展是由于入夜以后热岛 效应增强,引发低层气流发生辐合而引起的,如图 5(c)中对流正好在热岛引起的辐合区位置上发展起来 就很能说明这一问题. 尽管开始时对流回波范围仍 较小,但在其随后1h影响广州城区的过程中对流回 波得到进一步发展和增强,范围也扩大.如到了 22 时 30 分,回波主体已进入主要城区,城区上空为大 范围强回波占据,强度普遍达到了 45 dBz 以上(图 5(d)), 并由此带来了强的降水. 图 5(c), (d)中的等值 线是由自动站观测到的1小时雨量分析,受雷暴影响 时中心城区的雨强达到了 25 mm · h⁻¹ 以上.

2.3 8月07日的午后雷暴

8 月 7 日的雷暴出现在午后的 14 时以后,图 6 给出了此次雷暴的具体发展情况.前面已经提到,此 时广州城区热岛的强度最弱,比如在7日13时,广州 城区的温度大部份在 35℃ 以下,比其周边地区的温 度还要低(图 6(a)),但还是可以看到,由于受高温天 气的影响,其它大部地区尤其是紧邻城市西侧的温 度都仍在35℃以上,热岛残留在城市的西侧,尽管范 围小,但最高温度达37℃.

相应此时,由图 6(b)看到,一支偏西的气流经过 热岛吹向城区,可能受到热岛以及城市建筑物摩擦 阻挡的作用, 这支偏西气流在城市区的西侧发生明 显的辐合,辐合中心区略偏向于热岛的东侧,呈南北 向的分布. 尽管热岛范围小、强度弱, 但与之相对应 的辐合区中心值也达到了-4×10⁻⁴ s⁻¹ 以上,而且也 许是日间热岛比夜间较稳定条件下可更加有效地触 发上升运动发展的缘故,或者此时正是一天当中最 有利于对流发展的缘故(由 NCEP-FNL 资料计算的物 理量表明午后 14 时广州城区上空的 CAPE 已上升到 2378 J·kg⁻¹, 抬升指数也提高到了--5.4°K), 对流正 好也是在与热岛相对应的辐合区中发展起来. 由图 6(c)看到,7日14时辐合区中这种对流回波的强度 已达45 dBz以上,尽管范围仍较小,但与4日夜间雷 暴个例相似, 对流回波在随后 1 小时影响广州城区 的过程中强度也得到了增强,范围迅速扩大,并在偏 西气流的引导下,自西向东影响了广州城区.如图 6(d),7日15时强的对流回波已移到城区的上空,并 伴随出现了强降水,主要集中在城区.

3 讨论

在受热带气旋外围气流影响条件下,发生在广 州城区的两次雷暴过程均与 UHI 的影响有关.这主 要体现在对流和降水发生的时间和位置均与 UHI 的 演变及其相应的城市辐合区有良好对应关系.尤其 是4日夜间的雷暴,发生在 UHI 发展较强时,而7日 午后的雷暴,尽管发生在广州城区 UHI 强度相对较 弱的时段,但对流也是首先形成于温度相对较高的 区域,热岛效应引起的低层辐合对对流的启动发展 都应有重要作用.而且两次雷暴在移经广州城区上 空时都得到了进一步发展,主要降水区也都是落在 中心城区,这些特征都可以认为是受到城市影响的 一种体现.

对流与 UHI 的这种关系与以往的认识是一致的. UHI 的形成一方面改变了局地的环流,可形成相应的 城市辐合区,另一方面通过对低层大气的加热,使城 市边界层变得更加不稳定,从而更易于引发对流的 发展.这种观点一直以来都得到了许多观测分析结 果和模拟试验的证实,我们的分析结果也支持这一 观点.当然,由于缺乏对城市边界层尤其是垂直方向 上的观测,2个例子中 UHI 是如何影响了边界层的稳 定度我们的分析是很粗浅的.而且从所分析的例子





(a) 7 日 13 时地面温度分析(℃); (b) 7 日 13 时地面流场和散度场分析(×10⁻⁴ s⁻¹); (c) 14 时的雷达回波(填色区, dBz)和 1 h 降雨量(mm); (d) 15 时的雷达回波(填色区, dBz)和 1 h 降雨量(mm)

还可以看到,城区中还存在着由地表摩擦或建筑物 阻挡而引起的辐合区,对流回波移经城区发生增强 而不是分散减弱的现象与城区的这种辐合无疑也有 很大关系.但要完全区分不同因子对城区低层辐合 贡献的大小是困难的,这些都需要通过进一步的敏 感性数值模拟试验才能加以深入理解.另外,需要指 出的是两次雷暴均是在热带气旋影响背景条件下发 生的,热带气旋的外围气流无疑为雷暴的形成提供 了有利的环境条件,而且有可能在城区对流的启动 和发展过程中也起到一定的间接作用,但要全面地 认识这一问题还需要针对不同环境条件下城市的效 应开展更加广泛的研究.

此外,值得提及的是本次观测分析结果还给我 们带来了两点启示:

(1)前面分析所揭示的广州地区 UHI 强度在日 间表现较弱,城区温度甚至比郊区温度低的现象可 能并不是偶然的,与这一地区日间气溶胶排放的增 多可能有关.日间城区大气中烟尘等气溶胶颗粒物 的增多,一方面可以反射太阳辐射,削弱到达地面的 太阳辐射,另一方面作为凝结核,可导致低云、雾霾 的增多,起到一种"阳伞效应".其结果会导致日间 城区温度比郊区要低的现象,甚至还会影响到城区 降水量的大小.人为气溶胶排放增多对城市天气气 候的影响问题值得关注.

(2)不同地区城市对天气影响的具体过程应该 是不同的.所分析的两个个例中,UHI的位置均偏离 广州中心城区,位于城市的西北偏西一侧,这是否是 广州地区 UHI的一种分布特征,仍需通过更长时间 观测资料的分析加以证实.但我们注意到在两次雷 暴的发展过程中,均有来自珠江口及其附近沿海一 带偏南气流的参与,除了在城市辐合区的形成中扮 演重要角色外,这种来自沿海的气流可能对城市的 温度还起到调节作用,影响了广州地区热岛的分布. 这与内陆城市的情况不完全相同,来自海洋的气流 携带有丰富的水汽,这可能也是两次雷暴过程均带 来较丰富雨量的一个重要原因.广州以及珠江三角 洲沿海岸带城市群(区)对天气的影响可能独具特征, 有必要对此开展更加有针对性的研究.

4 结论

主要利用广州地区中尺度自动气象观测网的观测资料、雷达回波资料以及卫星 Tbb 资料等, 文章分

析了 2005 年 8 月初受热带气旋外围气流影响条件下 广州地区"城市热岛(UHI)"的发展和演变过程,并对 期间 8 月 4 日夜间和 7 日午后发生在广州城区的 2 次 雷暴过程及其与 UHI 的关系进行了研究.结果表明:

(1) 在这一时期, 广州地区 UHI 主要出现在中 心城区的西北偏西一侧, 夜间到次日的早晨强度最 强, 强度普遍超过 2℃, 最强时达到 3.8℃, 而日间的 热岛强度最弱.

(2) 在受热带气旋外围气流影响条件下,广州地 区发生的两次雷暴过程均与UHI相关,UHI引起局地 气流发生辐合并引发对流发展,对流和降水发生的 时间和位置均与UHI的发展演变及其相应的辐合区 有良好对应关系,对流易于在UHI发展较强的时段 和位置上发生.

(3) 受城市的影响,两次雷暴在移经广州城区时 均得到了进一步发展,强的对流回波位于中心城区 上空,降水也集中落在城区,是两次较为典型的在热 带气旋外围气流影响条件下由城市效应引发的雷暴 过程.

当然仅通过一两个个例的分析还很难概括出广 州城市对雷暴天气产生影响的总体特征,尤其是两 次雷暴均是在受热带气旋外围气流影响条件下发展 起来的,尽管城市的影响是明显的,但热带气旋本身 可能也在对流的启动和发展过程中起到一定的作用, 要全面地认识城市的影响问题还需要针对不同环境 条件下的城市效应开展更加广泛的研究.

参 考 文 献

- Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quart J Roy Met Soc, 1958, 84: 70-72
- 2 Changnon S A. The LaPorte weather anomaly fact or fiction? Bull Amer Meteorol Soc, 1968,49: 4—11
- 3 Landsberg H E. Man-made climate changes. Science, 1970, 170: 1265-1274
- 4 Changnon S A, Semonin S G, Auer A H, et al. METROMEX: a review and summary. Am Met Soc Monogr, 1981, 18: 81
- 5 Huff F A, Vogel J L. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. J Appl Meteor. 1978, 17: 565-577
- 6 Changnon S A. Rainfall changes in summer caused by St. Louis. Science, 1979, 205: 402–404
- 7 Bornstein R, LeRoy M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. Preprint volume, Fourth AMS Conference on Mesoscale Processes, Boulder, CO, 25-29 June 1990
- 8 Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. Dry and moist convection forced by

an urban heat island. J Appl Met, 2001, 40: 1462-1475[DOI]

- 9 Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound-Layer Meteor, 2000, 94: 357— 397[DOI]
- 10 Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case. J Met Soc Japan, 2004, 82: 67– 80[DOI]
- 11 Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J. Simulation of St. Louis Missouri, land use impacts on thunderstorms. J Appl Meteorol, 2003, 42: 716-738[DOI]
- 12 Niyogi D, Holt T, Zhong S, et al. Urban and land surface effects on the 30 July 2003 MCS event observed in the southern Great Plains.

J Geophys Res, 2006, 111, D19107, doi:10.1029/2005JD006746, 2006

- 北京市气象局气候资料室编著.北京城市气候.北京:气象出版社,1990.45-55
- 14 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 北京城市热岛"尺度"变化与城市发展. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 48(增刊 I): 97—106
- 15 Chen L X, Zhu W Q, Zhou X J, et al. Characteristics of the Heat Island Effect in Shanghai and Its Possible Mechanism. Adv Atmos Sci, 2003, 20(6): 991—1001
- 16 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. 大气科学, 2006, 30(2): 221-234
- 17 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 珠江三角洲都市群城市热岛效应初步 研究. 气象, 2004, 30(10): 12—16