

城市中水体的微气候效应研究

李书严^{1, 3, 5} 轩春怡^{2, 5} 李伟⁴ 陈洪滨¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国气象局大气探测与技术中心, 北京 100081

5 北京市气候中心, 北京 100089

摘 要 应用观测资料分析和数值模拟的方法来研究城市中水体的微气候效应, 结果表明, 城市中的水体对其周边的小气候有着明显的调节作用。城市中商业区温度最高、湿度最小; 交通区次之; 水体附近温度最低、湿度最大, 平均湿度比商业区高出约 10%。水体区的月平均温度日较差比其他功能区明显大。水体区的月平均温度比其他功能区低 0.37~1.15℃。水体对环境的影响主要发生在上风岸 2 km 以内和下风岸 9 km 以内, 以 2.5 km 以内最为明显。水体的面积和布局是影响小气候效应的重要因素。水体面积越大对环境影响越大, 单块的小于 0.25 km² 的水体对环境的影响不明显, 但是多块、密集分布的小面积水体会对环境的降温增湿效果更显著。在本文个例中, 与其他湖泊邻近的面积为 1.25 km² 的水体, 可以使 2.5 km 之内温差达到 0.2~1.0℃, 水汽比湿增加 0.1~0.7 g/kg。相对孤立的面积为 2 km² 的水体, 可以使 1.0 km 范围内降温幅度 0.6℃, 水汽比湿增加 0.1~0.4 g/kg。水体可以使地面风速增加, 一般能使风速增加 0.1~0.2 m/s。

关键词 城市中的水体 微气候效应 数值模式

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0552-09

中图分类号 P463

文献标识码 A

Analysis of Microclimate Effects of Water Body in a City

LI Shu-Yan^{1, 3, 5}, XUAN Chun-Yi^{2, 5}, LI Wei⁴, and CHEN Hong-Bin¹

1 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 National Atmospheric Observation and Technology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

5 Beijing Regional Climate Center, Beijing 100089

Abstract The microclimate effects of water body are studied by means of automatic meteorological observing station data analysis and numerical simulation. The results show that: The water body in a city contributes greatly to microclimate effects. Business areas have the maximum temperature and the minimum humidity, traffic areas take second place, and water body areas have the lowest temperature and the maximum humidity. The monthly-mean daily range of temperature in water body areas is obviously larger than that in other areas. Mean temperature in water body areas is 0.37-1.15℃ lower than that in other areas. The water body's microclimate effects are most obvious at the upwind shore within 2 km and at the lee shore within 9 km, especially within 2.5 km. The size and the distri-

收稿日期 2006-12-22, 2007-03-20 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40652001、40505002, 北京市自然科学基金项目 8051002, 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室资助

作者简介 李书严, 女, 1971 年出生, 工程师, 在读博士生, 主要从事城市气象、边界层物理方面的研究。E-mail: lishuyanlw@126.com

bution of the water body contribute greatly to microclimate effects. Single water body less than 0.25 km² almost has no influence on the environment, while multiple, dense water body can obviously affect the microclimate. The water body with area of 1.25 km² which abuts on other water bodies can make the temperature decrease by 0.2–1.0℃ and make the water vapour content increase by 0.1–0.4 g/kg within 2.5 km. An isolated water body with area of 2 km² can lead to 0.6℃ decrease in the temperature and 0.1–0.4 g/kg increase in the water vapour content within 1.0 km. The water body also has effects on wind. The wind speed near the water body may increase by 0.1–0.2 m/s.

Key words water body in a city, microclimate effect, numerical model

1 引言

快速城市化使得城市下垫面发生巨大的变化,城市中水体面积迅速减少,城市湿地环境逐渐丧失。以北京为例,20 世纪 60 年代~70 年代中期,有 8 个湖泊共 33.4 hm² 面积被填,具有 500 年历史的护城河也遭同样厄运,1953 年护城河长度为 41.19 km,现在剩下的总长度不到原来的 10%。美国农业部门的研究表明,城市化进程都不可避免地涉及侵占湿地问题,美国迄今已丧失了 58% 的湿地^[1]。近些年来,城市气候方面的研究开展得较多^[2,3],有关湿地对气候的影响,国内外研究也已有不少^[4~9]。但城市中水体对于调解局地小气候环境方面的研究开展得还不是很多。在韩国首尔^[10],为了缓解城市热岛的压力,改善空气质量,在人口密集的市中心区,将 20 世纪 50 年代就已改为地下排水渠的 Cheong-Gye 河重新挖开,河道上方的公路被移走,重现绿意盎然的宜人空间和开阔的水面。从河流重建前到建成后在河道附近进行的气象观测表明:市区河道恢复对减轻城市热岛有重要作用。杨凯等^[11]对上海城市中河流及水体周边环境进行温度和湿度的实地观测,发现水体有降温、增湿、提高人体舒适度的效应;水体面积和水体周边建筑物都是影响小气候效应的重要因素;“水绿”复合生态系统有利于水体小气候效应发挥;另外喷泉等人工设施强化了水体的小气候效应。在很多城市,保护城市环境,缓解热岛压力,尤其是保护和复苏生态小区备受关注。像北京这样的超大城市,在市中心区,较大的湖泊或河流并不多。尽管相对于整个城市而言,水体所占面积很小,但它的存在却可以制造出温度差,这种温度差就像城郊之间存在的温差一样,整个城市的能量平衡通过增加更多的蒸发表面而改变,更多吸收的辐射以潜热而非感热的方式被消散,从而降低气温,减轻热岛效应。

适量增加水面面积是一种能为人们接受的人为改变城市下垫面的手段,且可采取多种布局方案。在目前的城市规划建设中,北京市规划委员会计划在城市中心城区拓宽原有河道,对城区部分河流及湖泊进行扩建,增加蓄滞洪区,扩大水面的面积,这对于缓解热岛效应,改善气象环境,提高人体舒适度是很有意义的举措。然而,由于受到城市空间的影响,城区中水体面积的增加是有限度的,有限面积的水体增加究竟对周围带来多大影响,这是我们要研究的问题。在过去对水体的小气候效应研究里,主要是应用资料分析的方法,资料的获取往往受到地理条件、时间及其他原因的限制。在本文中,我们除了对观测资料进行分析以外,又应用数值模拟手段对水体面积及布局对城市气象环境的影响进行比较细致的模拟,分析其影响范围和程度,可以弥补资料不足的缺憾,并可以对水体与气候关系进行更细致的分析。

2 观测资料分析

2.1 观测方法

所采用的仪器为 CAWS 系列自动观测仪,观测前已经过专门气象仪器检测单位校准。各项要素的观测精度如表 1 所示。观测期间测定高度距地面 1.5 m,采用仪器自动记录功能,监测频率为 2 min。

表 1 CAWS 系列自动观测仪的性能
Table 1 CAWS automatic meteorological observing instrument's capability

要素	测量范围	分辨率	准确度
气温/℃	-50~+50	0.1	±0.2
相对湿度(%)	0~100	1.0	±3(T>0℃), ±5(T≤0℃)
风向(°)	0~360	2.5	±5
风速/m·s ⁻¹	0~75	0.1	±0.03
雨量/mm	0~99.9	0.1	±0.3
气压/hPa	450~1060	0.1	±0.3

在本研究中,我们在北京城区选取 7 个自动气象站点,靠近水体的站点有 2 个:玉渊潭站点位于玉渊潭公园里的湖边;海淀站点位于海淀公园里的水边。远离水体的 5 个站点分布在商业区和交通区:西直门站、丽泽桥站、车道沟站、天安门站(位于交通主干道旁)、公主坟站(位于公主坟商业圈内)。各站点位置分布如图 1 所示。在城区 7 个站点 2005 年 1~9 月每天逐时进行观测,观测内容有:最高气温、最低气温、平均风速、风向等要素,相对湿度只有 6、7、8 月有观测资料。玉渊潭站是新建站点,1~4 月资料缺测。资料分析过程中,以靠近水边的玉渊潭站、海淀站 2 个站代表水体区;以公主坟站代表商业区,以丽泽桥、西直门、天安门、车道沟站 4 个站代表交通区。

2.2 观测资料分析结果

根据观测,白天最低温度通常在水体附近观测到,较高温度通常在商业区测得。夜间,较低气温出现在水边,较高温度出现在交通区。水边温度日变化相对较大,商业区温度日变化相对较小。夏季商业区内日平均温度是 26.47℃,平均湿度是 60.91%;交通区日平均温度是 26.34℃,平均湿度是 70.56%;水体区日平均温度 26.16℃,平均湿度是 70.79%。商业区人为热释放多,又多为不透水的沥青和水泥地面,热容量小,因此商业区是白天高温持续时间长、湿度最小的地方;交通区车流量大,一方面车辆散热不容忽视,另一方面尾气中的颗粒污染物吸收地面长波辐射,加热大气使空气热量不容易很快散失,这些因素都会使气温升高。水体表面的水汽蒸发、热量交换比其他区域高,因此水体区是这几种功能区中温度最低、湿度最大的地方,相对湿度比商业区高出约 10%。在湿热的环境里,这种微小的差异也会影响到人的舒适度。

表 2 为 1~9 月各月各站的月平均气温。分析结果表明,冬季(1~2 月)水体区平均气温-2.85℃,交通区-2.13℃,商业区-1.70℃,水体区的平均气温较其他地区低 0.72~1.15℃。春季(3~5 月),水体区平均气温 15.68℃,商业区 14.8℃,交通区 14.63℃,水体区较其他地区高 0.88~1.05℃。夏季(6~8 月),水体区平均气温 26.57℃,商业区 27.07℃,交通区 26.94℃,水体区较其他地区低 0.37~0.5℃。秋季(9 月),水体区最高气温 21.8℃,商业区 22.8℃,交通区 22.45℃,水体

表 2 北京城区各站月平均气温对比表(单位:℃)

Table 2 Mean monthly temperature (℃) for every station in the Beijing urban area

月份	玉渊潭	海淀	车道沟	西直门	丽泽桥	天安门	公主坟
1		-2.8	-1.6	-1.8	-2.5	-1.7	-1.4
2		-2.9	-2.3	-2.2	-2.5	-2.4	-2.0
3		6.2	7.0	6.8	6.6	6.9	7.1
4		16.1	16.9	16.6	16.7	16.8	16.9
5	20.5	19.9	20.4	20.3	20.4	20.2	20.4
6	25.9	25.5	26.1	26.0	26.1	25.9	26.1
7	28.3	27.9	28.4	28.5	28.5	28.4	28.6
8	26.0	25.8	26.4	26.4	26.2	26.4	26.5
9	22.1	21.5	22.5	22.6	22.1	22.6	22.8

表 3 北京城区各站各月平均温度日较差对比表(单位:℃)

Table 3 Monthly means of daily range of temperature (℃) for every station in the Beijing urban area

月份	玉渊潭	海淀	车道沟	西直门	丽泽桥	天安门	公主坟
1		8.3	5.7	6.9	6.9	5.8	5.2
2		7.4	5.6	6.6	6.5	5.9	5.5
3		12.0	8.6	10.8	10.6	8.6	8.3
4		11.6	9.1	11.1	11.1	8.9	8.8
5	10.4	10.6	8.0	10.1	10.0	8.2	8.0
6	11.2	10.2	8.9	10.5	10.8	9.2	8.8
7	9.5	8.4	7.7	8.8	8.4	7.6	6.9
8	8.5	7.4	6.6	7.9	8.0	6.5	6.1
9	9.8	9.9	7.5	9.1	9.5	7.5	7.0

区较其他地区低 0.65~1.0℃。总的来说,冬、夏、秋季水体区的日平均温度比其他功能区低 0.37~1.15℃。由此也可以说明水体的存在对缓解城市热岛有一定的作用。

表 3 为各站各月平均温度日较差对比表。冬季(1~2 月),水体区、交通区、商业区的温度日较差分别为 7.85℃、6.24℃、5.35℃,水体区比其他功能区高出 1.61~2.5℃。春季(3~5 月),水体区、交通区、商业区的温度日较差分别为 11.15℃、9.59℃、8.37℃,水体区比其他功能区高出 1.56~2.78℃。夏季(6~8 月),水体区、交通区、商业区的温度日较差分别为 9.2℃、8.41℃、7.27℃,水体区比其他功能区高出 0.79~1.93℃。9 月份,水体区、交通区、商业区的温度日较差分别为 9.85℃、8.4℃、7.0℃,水体区比其他功能区高出 1.45~2.85℃。可以看出,水体区的平均温度日较

差最大，交通区次之，商业区最小。水体区的月平均温度日较差比其他功能区明显高，以冬、春和秋季差异最大，夏季略小。按常理来说，陆地气候的特点是温度变化快、变化大；水体的热容量较陆地大，所以水体温度日较差、年较差都较陆面小。而

我们这次观测到的现象正好相反，这主要是因为商业区或交通区受人为热源的影响，夜间温度不易下



图 1 北京城区的自动气象站点分布示意图

Fig. 1 Distribution sketch map of automatic meteorological observing stations in the Beijing urban area

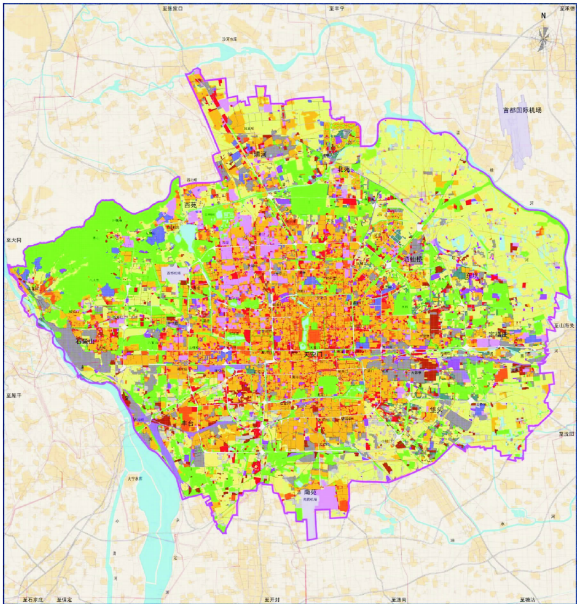


图 2 模拟区域用地类型现状图

Fig. 2 Land-use types of the simulation domain

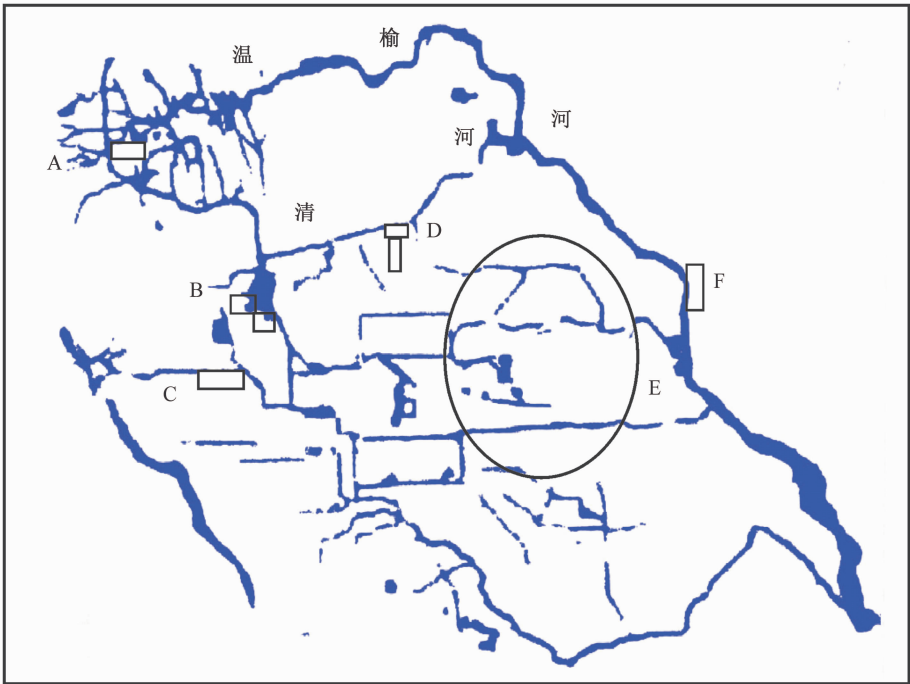


图 3 模拟区域中新增加水体位置的示意图

Fig. 3 Location sketch map of added water areas in the simulation domain

降,造成日较差小;而靠近水体的站点都在公园里,不受人为热的影响。可见,在城市中人类活动对环境气温升高产生的影响是不可忽视的。

3 模式简介及数值试验的设计

3.1 模式方程组

本文所利用的数值模式(RBLM)^[12]是一个三维非静力区域气象和大气扩散数值预报模式,模式采用 Reynolds 平均的大气运动控制方程组,包括动量方程、热流量方程、水物质(水汽、云水、雨水)的守恒方程。

为了引入地形方便,RBLM 采用地形跟随坐标系,把在物理空间中曲线坐标系的不规则网格通过坐标变换转化为规则的计算网格,并在计算空间中对模式方程组进行数值积分。此外,计算边界的规则形状也有利于边界条件的处理。定义坐标变换:

$$z^*(x, y, z) = (z_f - z_r) \frac{z - z_g(x, y)}{h_d - z_g(x, y)} + z_r,$$

其中, z 是笛卡儿坐标系下的垂直坐标, h_d 是模式顶高, z_g 是地形高度, z_r 是模式的参考高度, z_f 是模式从地形跟随坐标转化到笛卡儿物理坐标的高度。模式的控制方程组在地形跟随坐标系下变换成:

$$\begin{aligned} J_1 &= -\frac{\partial z}{\partial x}, \\ J_2 &= -\frac{\partial z}{\partial y}, \\ J_3 &= -\frac{\partial z}{\partial z^*}, \\ w^* &= \frac{uJ_1 + vJ_2 + w}{J_3}. \end{aligned}$$

3.2 参数化方案

RBLM 模式参数化方案主要包括湍流参数化方案(采用 Deardorff 的 1.5 阶能量闭合方案^[13])、Kessler 暖云雨参数化方案^[14]、地表通量参数化方案^[15, 16]和土壤-植被两层模式^[17, 18]。

3.3 边界条件

模式采用 Durran 和 Klemp^[19]提出的辐射边界条件。

3.4 陆面过程

采用 Pleim 等^[17]和 Xiu 等^[18]提出的土壤-植被模式。

3.5 变量分布与数值积分方案

RBLM 模式采用 Arakawa-C 网格,大部分标

量定义在格体的中央,速度分量 u 、 v 、 w 相互叉开,分别定义在格体表面中心,坐标 x 、 y 、 z 分别定义在速度分量 u 、 v 、 w 所在点上。由于 RBLM 模式的方程组是可压缩的,所以模式中包含声波,而声波的出现大大限制了模式的显式积分时间步长,为了提高模式的运行效率,RBLM 采用时间分裂方案,即将大的时间积分步长分为数个小的时间步长,用小时步对模式方程组中与声波有关的项进行积分,而其他项在大时步中积分,所以仅仅小时步的步长受声速限制。

3.6 资料的应用

模拟域中地形高度资料和下垫面用地类型资料由北京市地理信息系统(GIS)的数据库(分辨率 100 m)和中国城市规划设计院提供的高分辨率的卫星遥感图像(分辨率 100 m)给出,所需的气象资料为探空资料和地面观测资料。探空资料取自北京南郊观象台,地面观测资料取自城区 6 个地面自动气象站,分别为海淀、车道沟、西直门、丽泽桥、天安门和公主坟。本文采用城区 1 月份、8 月份 4 年平均的地面气象资料和探空资料内插得到模式的气象初始场。

3.7 数值实验的设计

本研究中,模式模拟范围为北京城区 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 区域(如图 2 所示),模拟中心为 $(40^\circ 15' \text{N}, 116^\circ 27' \text{E})$,水平网格分辨率为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$,垂直方向采用拉伸网格,从地面到 5400 m 分为不等距的 33 层,垂直最小格距为 20 m,第一层的高度为 10 m。地面覆盖物的热性质等参数取自文献^[15, 16]。

根据北京市规划委员会提供的北京河湖湿地规划图,将分别增加永定河水系、通惠河水系、坝河水系、温榆河水系、凉水河水系和南沙河水系,共 1260.6 hm^2 湿地。为方便研究,我们将新增加的水体面积在模式中以规则形状来表示。如图 3 所示,A、B、C、D、E、F 分别表示新增加的水体,面积分别为:A 区 1 km^2 ,B 区 1.25 km^2 ,C 区 1 km^2 ,D 区 2 km^2 ,E 区中由多个分散面积为 0.25 km^2 的水体组成,F 区 1.75 km^2 。在数值模拟试验中,我们将这几个区域的下垫面改为水面,模拟了冬季和夏季两个季节增设水体后对局地气候的影响。首先对环境现状进行了模拟,然后模拟水体面积增加后的微气候变化。

4 数值模式的检验

以海淀自动气象站一天的地面观测资料为例，对模式进行检验和分析。观测时间为 2005 年 8 月 15 日 08 时~16 日 08 时，这段时间北京一直处于弱高压控制下，天气晴朗，风速不大。将 2005 年 8 月 15 日 08 时的地面观测资料及探空资料作为模式的初始场，共模拟了 24 小时。将模拟结果与观测结果相比较（如图 4a 所示），可看出白天 13:00~20:00 模拟结果较好，模拟的地面气温和实测趋势基本吻合，然而夜间数值有些偏差，其原因可能是由于模式未考虑建筑物的热量储存和城市人为热源所致。如图 4b 所示，地面水平风速的预报结果与实际观测结果相比，基本反映了日变化规律。地面

气温的预报效果优于风速的预报效果。另外，应用其他 6 个自动气象站的观测资料作为模式的初始场进行模式的检验，也得出与上面基本一致的结论。这说明 RBLM 模式中的陆面过程模式对城市这种复杂下垫面的预报模拟是成功的。

5 京城区现状气象环境场的数值模拟

以城区 6 个地面气象站 1 月份、8 月份 4 年平均的气象资料和探空资料内插得到模式的气象初始场，图 5a、b 是 1 月 14 时、8 月 14 时近地层气流、温度场的模拟结果。夏季的气象环境受大尺度系统影响较弱，受局地山谷风环流影响大，从图 5a 可以看出近地层气流场特征表现为典型的山地-平原地形中尺度环流系统。夜间到中午（图 5a），除了北

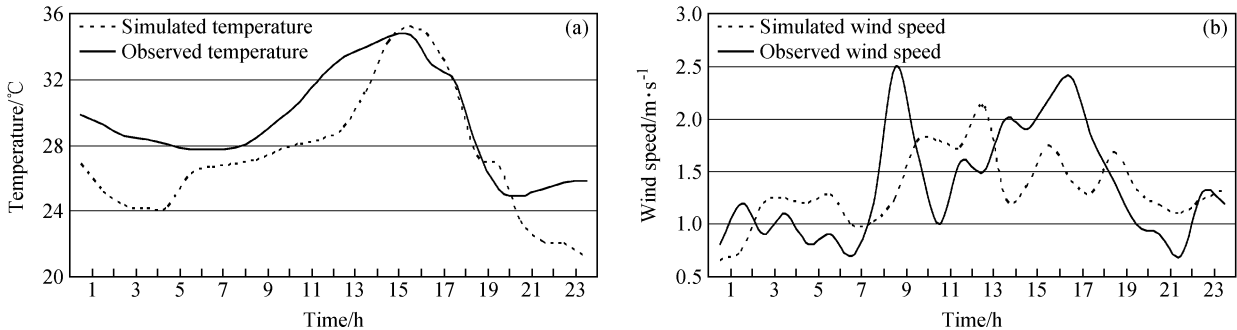


图 4 海淀站 8 月 15 日 08 时~16 日 08 时观测与模拟结果的比较：(a) 平均温度；(b) 平均风速
Fig. 4 Comparison between the simulated and observed (a) temperature and (b) wind speed at Haidian station from 0800 LST 15 Aug to 0800 LST 16 Aug

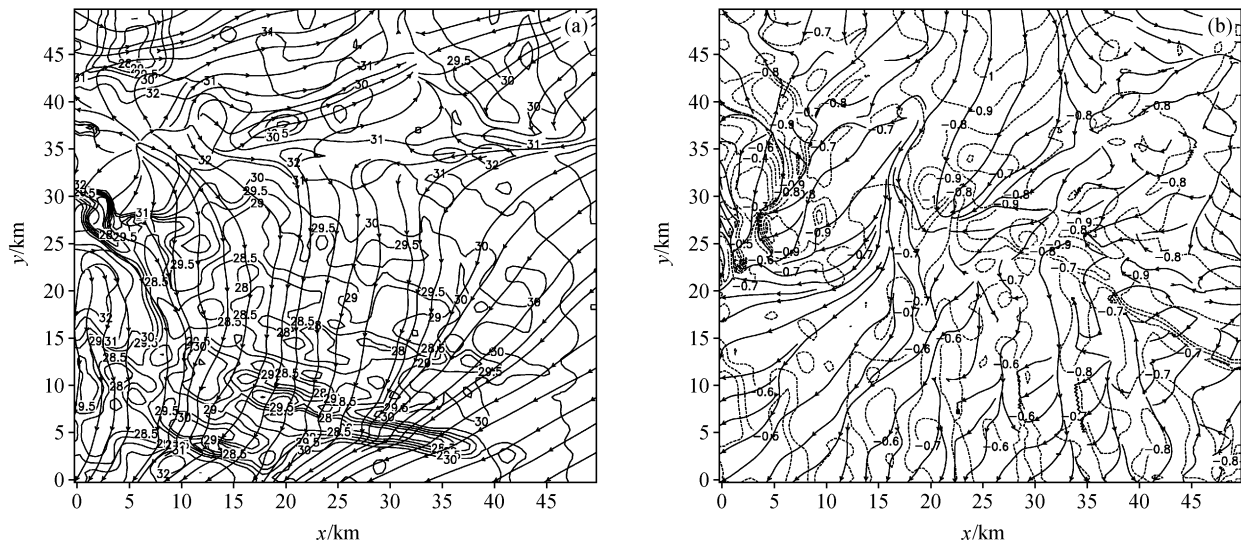


图 5 北京城区近地层 (10 m) 风、温度场 (单位: °C) 的数值模拟结果：(a) 8 月 14 时；(b) 1 月 14 时
Fig. 5 Horizontal distributions of simulated wind and temperature (°C) at 10-m height in the Beijing urban area; (a) 1400 LST Aug; (b) 1400 LST Jan

部有偏西风以外,市区主要吹偏北的下坡风气流;随后风向逐渐转向东南的上坡风气流。整个市区风速不大,平均 1.2 m/s。由于本研究中没有考虑人为热源对大气底部的加热作用,只考虑城市下垫面特殊的热力性质,所以温度分布上热岛效应不明显。

北京市区冬天低层大气流场的日变化很小,风向比较固定,受大尺度系统的影响比较大,主要是偏北风(图 5b),受下垫面粗糙度的影响,风向有些杂乱,风速较小,约为 1 m/s 左右,这反应了市区密集的建筑群对低层大气流场的空气动力学效应。从温度分布上看,热岛效应不明显。

6 增设水体后规划方案的模拟结果

6.1 水体的温度效应

水域与陆面温度的差异主要取决于三个因素:一是水面反射率比陆面小,接受太阳辐射比陆面多,会使水体具有增温效应。二是水体的热容量比土壤大,增热期间可以有更多热量存储于水体内部,缓和水面和水上空气的增温,具有降温效应;降温期间,则有较多的热量从水体放出,缓和水面和水上空气降温,具有增温效应。三是水面上平均风速较大,水面蒸发和蒸发耗热比陆面大,具有降温效应。

模拟结果表明,水体白天有降温效应,夜间有升温效应。水体对气温影响在上风方向影响范围小,下风方向影响范围大。图 6 显示了 8 月份(以 14 时为例)规划与现状的温度、比湿和风速差值(规划方案减去现状)。图 6a 是 8 月(14 时)规划和现状的温度差值,可以看出增设水体的 A~F 区及其下风方温度都明显降低。B 区(1.25 km²)降温幅度最大,下风方 1.0 km 内温度降低 0.8~1.0℃,直到 2.5 km 处仍有 0.2℃的温差。离岸距离越远,温度改变随之减小。B 区南部的 C 区增设的 1.0 km²水体面积也使得下风方 1.25 km 内温度降低 0.6℃。B 区和 C 区增设的水体面积都相对不大,但降温效应明显,这可能是由于 B 区上风方向有昆明湖和圆明园湖,大面积水面蒸发通过风场的水平输送供给 B 区和 C 区更多的水汽,强化了 B 区和 C 区的气象场影响力度,从而形成更大范围的降温区,在 C 区的下风方可以影响到距离水边的 9 km 处。这一方面说明大面积的水体对环境气候

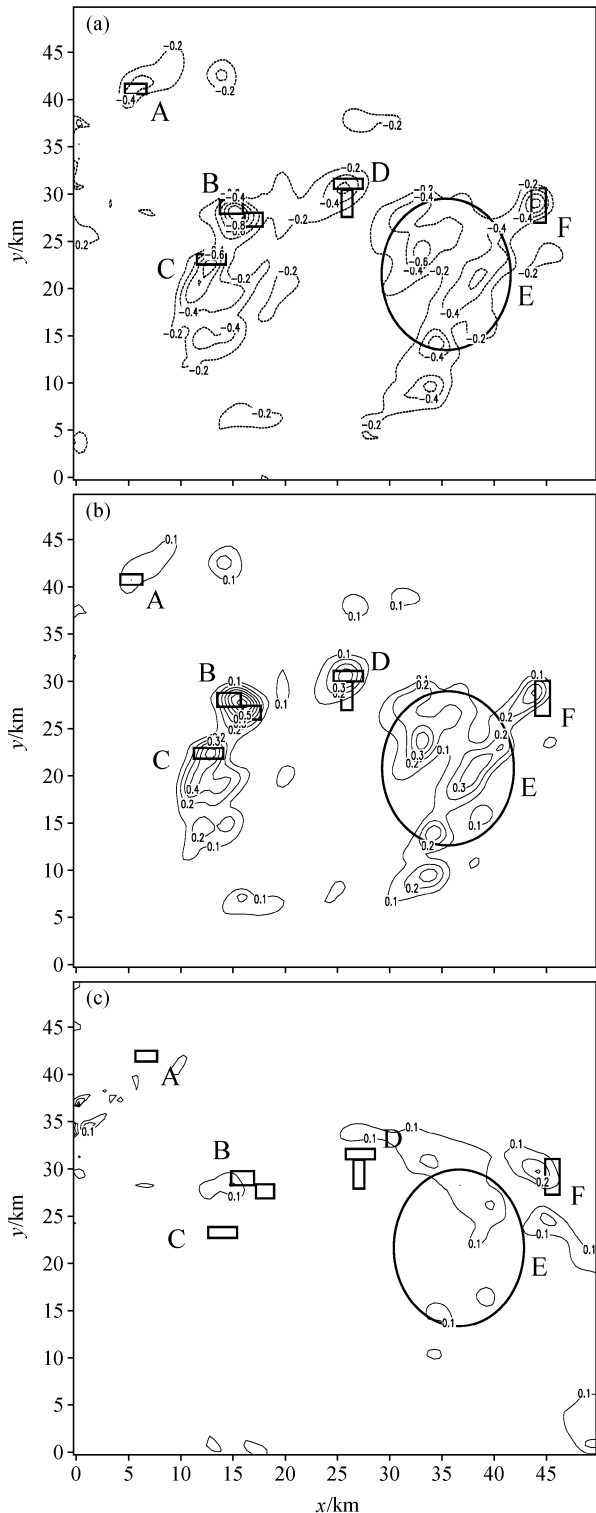


图 6 8 月(14 时)模拟的规划与现状温度(a, 单位:℃)、水汽比湿(b, 单位:g/kg)和风速(c, 单位:m/s)的差值
Fig. 6 Differences of simulated (a) temperature (°C), (b) water vapour content (g/kg) and (c) wind speed (m/s) between designed scheme and current status at 1400 LST Aug

的改变更明显,另一方面,B区降温幅度比其他区域都大,也从侧面说明了多块水体的组合布局可能会进一步加强水体的微气候效应。E区由多个零散的小面积水体(0.25 km^2)组成,但是分布较密集,多块水体对大气温度、湿度等的总贡献产生一种“湖泊效应”,通过垂直湍流交换过程把下垫面温度、湿度特征传给上方的大气,然后通过风场的水平输送传给周边及其下风方向,从而使E区的影响面积最大,只是由于单体面积小所以降温幅度偏小,最大温差为 0.6°C 。这表明,虽然单块小面积水体降温效应不大,但多块水体如果在城区的布局比较紧凑,对环境的影响范围还是很大的。D区增设的水体面积是 2 km^2 ,使得下风方 1.0 km 范围内温度降低 $0.4\sim 0.6^\circ\text{C}$ 。与B、C区和E区相比较,D区没有体现出水体面积越大影响力度越大的优势,这也说明多块面积水体的组合产生的降温效果可能比单块较大面积水体效果更好。东部的F区增设的水体面积为 1.75 km^2 ,使得下风方 1.25 km 范围内温度降低 $0.4\sim 0.6^\circ\text{C}$,F区增设的水体面积比D区小,然而降温幅度和影响面积都大于前者,这可能是因为F区上风方与河道毗邻,西南部又与E区连成片,近距离内水域互相影响的缘故。另外,在模拟域的南部也有零星的新增设水体,由于面积小,零散分布,所以对环境贡献不大。

冬季水体对环境的影响不如夏季明显。E区在其下风方产生了一定的降温效应,使下风方一定范围内温度降低 0.1°C 。其他区域水体的增设没有对邻近环境产生明显影响。这主要是由于冬季平均风速较小,水面结冰,蒸发量减小,因此对环境的温度、湿度影响也变小。

6.2 水体的湿度效应

水面和陆地空气湿度的差异主要是由水面和陆地的蒸发和温度不同而引起。夏季(图6b),在水汽比湿的分布上也表现出与温度同样的规律,B区和C区比湿的增量为 $0.1\sim 0.7\text{ g/kg}$,影响的最远端在下风方向距离C区水边 12 km 处;D区比湿的增量为 $0.1\sim 0.4\text{ g/kg}$,影响的最远端在下风方向距离D区水边 2 km 处。E区的多个小面积水体分布较密集且与F区临近,也是水汽增加影响面积较大的区域,增加值最大 0.4 g/kg 。其他南部等地更为零散的新设水体,也对环境湿度产生了一定的影响。

冬季(图略),A、B和C区水体的增设没有对环境湿度产生明显影响,E区在其下风方产生了一定的增湿效应,一定范围内水汽增量为 0.2 g/kg 。

6.3 水体对风速的影响

风速场的改变主要受水陆粗糙度差异的动力作用及水陆热力差异的热力作用的影响。几个区域水体的增设使得地面粗糙度减小,从而使风速在这几个区域都略有增加。从夏季风速的差值图(图6c)上看,A区下风方风速增加了 0.1 m/s ,B区水体周边风速增加了 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ 。E区和F区的风速影响面积最大,风速增量 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ 。冬季(图略),水体在下风方造成的风速差值为 $0.2\sim 0.4\text{ m/s}$ 。这可能是因为风速的改变不仅与路面粗糙度大小有关,而且还与大气层结有关。夏季空气较不稳定,陆上空气的湍流强,上下层的混合作用也增强,地面风速大;而这时水上空气则比较稳定,上下层混合作用弱,水面上的风速就小。这种因水陆大气稳定度差异而产生的风速变化与水陆粗糙度造成的风速改变相抵消。而冬季情况正好相反,大气层结加强粗糙度的影响,使得风速改变加大。

7 总结

观测资料的分析 and 数值模拟的结果都表明,城市中的水体具有明显的微气候效应。

(1) 观测分析表明,城市各种功能区中商业区温度最高,湿度最小;交通区次之;水体附近是温度最低、最湿润的地方,平均湿度比商业区高出约10%。水体区的月平均温度日较差比其他功能区明显大。水体区的月平均温度比其他功能区低 $0.37\sim 1.15^\circ\text{C}$ 。

(2) 夏季,水体对环境的影响主要发生在上风岸 2 km 以内和下风岸 9 km 以内,以 2.5 km 以内最为明显。离岸越远影响越弱。与较大面积水体邻近的面积 1.25 km^2 的水体,可以使 2.5 km 之内温差达到 $0.2\sim 1.0^\circ\text{C}$,水汽比湿增加 $0.1\sim 0.7\text{ g/kg}$ 。孤立的面积 2 km^2 的水体,可以使 1.0 km 范围内降温 0.6°C ,水汽比湿增加 $0.1\sim 0.4\text{ g/kg}$ 。冬季水体对环境的温、湿度影响不如夏季明显。

(3) 增加水体使地面风速增加,一般能使风速增加 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ 。由于大气层对粗糙度的影响在夏季削弱,在冬季增强,因此风速在夏季改变小,冬季改变大。

(4) 水体的面积和布局是影响小气候效应的重要因素。水体面积越大对环境影响越大, 单块、小于 0.25 km^2 的水体对环境的影响不明显, 多块、密集分布的小面积水体会对环境的降温增湿效果更显著。

总的来说, 应用数值模式模拟城市下垫面覆盖类型的改变对环境的影响是可行和有效的, 应用模拟方法可以弥补观测实验的不足与不全。本文的初步探讨也为以后进一步研究地-气之间多因子相互反馈过程、下垫面变化和气象场之间相互影响机制做了一些探索和准备。

参考文献 (References)

- [1] 潮洛蒙, 俞孔坚. 城市湿地的合理开发与利用对策. 中国建设信息, 2005, **3**: 9~12
Chao Luomeng, Yu Kongjian. Countermeasure of city wetland's rational exploitation and utilization. *Journal of Building Information* (in Chinese), 2005, **3**: 9~12
- [2] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对北京边界层结构研究. 大气科学, 2007, **31** (1): 37~47
Jiang Wei-Mei, Chen Yan. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 37~47
- [3] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究. 大气科学, 2007, **31** (2): 312~320
Sun Ji-Song, Shu Wen-Jun. The impact of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 312~320
- [4] 傅抱璞. 我国不同自然条件下的水域气候效应. 地理学报, 1997, **52** (3): 246~297
Fu Baopu. Water area's climatic effect in different natural condition in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1997, **52** (3): 246~297
- [5] Christensen T R, Jonasson S, Callaghan T V, et al. On the potential CO_2 release from tundra soils in a changing climate. *Appl. Soil Ecol.*, 1999, **11**: 127~134
- [6] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resource Research*, 2000, **36** (1): 3~10
- [7] Lahmer W, Futzner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth* (B), 2001, **26** (7): 565~575
- [8] Wang Hanjie, Jing Li, Gao Yunxiao. A simulation study on the shrunk wetland around Qinghai Lake and regional climate. *Wetland Science*, 2006, **3** (2): 87~93
- [9] 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 绿洲效应的模拟及内外因子的敏感试验. 大气科学, 2005, **29** (6): 997~1009
Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. Numerical simulation of oasis effect and its sensitivity test of inside and outside factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 997~1009
- [10] Toshiaki Ichinose. Monitoring and precipitation of urban climate after the restoration of a Cheong-gye Stream in Seoul Korea. *IAUC Newsletter-International Association for Urban Climate*, Issue No. 11, June, 2005. 11~14
- [11] 杨凯, 唐敏, 刘源, 等. 上海中心城区河流及水体周边小气候效应分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 2004, **3**: 105~113
Yang Kai, Tang Min, Liu Yuan, et al. Analysis of microclimate effects around river and waterbody in Shanghai urban district. *Journal of East China Normal University* (Nature Science) (in Chinese), 2004, **3**: 105~113
- [12] 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 北京地区气象环境数值模拟试验. 应用气象学报, 2002, **13** (特刊): 61~68
Xu Min, Jiang Weimei, Ji Chongping, et al. Numerical modeling and verification of the boundary layer over Beijing area. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2002, **13**: 61~68
- [13] Deardorff J W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, 1980, **18**: 495~527
- [14] Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteor. Monogr.*, 1969, **10** (32): 86~87
- [15] Businger J A, Wyngaard C, Izumi Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 181~18
- [16] Byun D W. On the analytical solutions of flux-profile relationships for the atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 1990, **29**: 652~657
- [17] Pleim J E, Xiu A. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34** (1): 16~32
- [18] Xiu A, Pleim J E. Development of land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40** (3): 192~209
- [19] Durran D R, Klemp J B. The effects of moisture on trapped mountain lee waves. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **39**: 2490~2506