

绿化带对城市大气环境及空气质量的影响

范丽雅¹ 刘树华¹ 刘辉志² 桑建国¹

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 采用北京大学城市大气边界层模式模拟了城区下风向绿化带对城市温度场、风场及空气质量的影响。模拟表明, 一天中不同时刻绿化带附近存在不同程度的污染加重现象, 上午 10:00 (北京时) 污染浓度最大增加 66%; 绿化带降温范围最大达到下风向 0.5 km。同时还进行了下风向绿化带与城区加强绿化的对比数值试验, 结果表明, 城区加强绿化后绝大部分范围气温出现较明显下降, 最大降温幅度为 1.6 °C。此项研究可为园林及城市规划等部门提供参考。

关键词 绿化带 污染浓度 热岛强度 热岛环流 次生环流

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0085-09 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

The Impact of Greenbelt on Urban Atmospheric Environment and Air Quality

FAN Li-Ya¹, LIU Shu-Hua¹, LIU Hui-Zhi², and SANG Jian-Guo¹

1 *Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*

2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The impact of greenbelt at the downwind periphery of an urban area on urban atmospheric environment and air quality was simulated by using the Peking University Urban Atmospheric Boundary Layer Model. Three cases with different distribution of greenery patches were tested. The results show that the temperature change caused by greenbelt may induce secondary circulation and pollution redistribution. After construction of the greenbelt, the pollution increase with maximum value of 66% at 1000 BT (Beijing Standard Time) is found. The scope of temperature drop of the greenbelt can only extend to 0.5 km downstream. If the trees in the greenbelt are evenly distributed on the urban area, the drop of temperature will appear over the whole urban area with the maximum of 1.6 °C at the downwind area. The research may be beneficial to a better understanding of the effects of greenbelt on the urban environment and well designing urban greenbelt patches.

Key words greenbelt, pollution, intensity of heat island, heat island circulation, secondary circulation

1 引言

20 世纪一些西方国家在城市发展规划建设中, 往往在城市周围构筑大型绿化带, 一方面用

来限制城市扩张, 保护邻近农田和自然资源, 另一方面为公众提供了休闲、娱乐, 走进自然的场所。例如, 加拿大政府于 1950 年在首都渥太华建立了国家绿化带, 平均宽度为 4 km, 总长度约 40 km^[1]。

收稿日期 2004-07-23 收到, 2005-09-27 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40275004

作者简介 范丽雅, 女, 1977 年 5 月出生, 硕士, 主要从事大气边界层物理与大气环境方面的研究。E-mail: lyfan77@hotmail.com

而如今随着城市化进程的不断加快,城市环境受到了不同程度的破坏,空气污染、热岛效应等为代表的城市环境问题越来越引起人们的重视,人们再次将目光投向大型绿地的建设,希望通过增加城市植被来改善城市空气质量、缓解城市热岛效应。例如,北京市园林专家建议沿城市主导风向,从城区的5个不同方向建立7条“楔形绿带”,在城市与郊区之间建立绿色生态廊道,将郊区凉爽、洁净的空气引入市内,恢复和完善生态系统^[2]。

西方国家的环城绿带曾有效地缓解了城市的蔓延,已有的研究也表明增加城市植被可以在一定程度上改善城市环境。例如,Civerolo等^[3]研究表明当40%的城市下垫面被改变为落叶林时,地表温度和风速都发生了实质性的下降。Sailor^[4]研究提出增加城市植被种植面积可以显著降低整个区域的温度,对于减少夏季制冷所需能源消耗有着重要意义。Nowak等^[5]分析了城市树木对臭氧空气质量的影响,指出树木可以改变干沉降和气象条件,特别是空气温度、风速和边界层高度,从而可以改变臭氧浓度。然而对于绿化带这种特殊形态的大型陆地,已往的文献多是从园林、景观生态学^[1,6]方面进行评述或对其防控有毒有害气体的特殊用途^[7,8]进行的研究,而对于其对气象环境场的影响、改善城市环境的效果却研究甚少。

佟华^[2]运用城市边界层模式模拟了上述“楔形绿带”建成前后的地表温度场和风场,研究发现上午10:00(北京时,下同)位于城市上风向的楔形绿地能够使风速加强,清凉空气可以进入市区,但下风向的绿地却使风速减弱,使得下风向通风能力下降。

本文设计了一个城市、郊区、绿化带模型,重点对位于城市下风向的绿地进行研究,运用北京大学城市大气边界层模式模拟考察了其对空气污染物扩散的影响及缓解城市热岛效应的作用。

2 数值模式

2.1 模式方程组

模式采用地形追随坐标系 $(x, y, \bar{z})$,以反应下边界地面的起伏变化。垂直坐标变换表示为

$$\bar{z} = H \frac{z - z_g}{H - z_g},$$

其中, z 为笛卡儿坐标系 (x, y, z) 的垂直坐标, $z_g = z_g(x, y)$ 为地形高度, H 为模式顶部高度, $\bar{z}$ 为变换后的垂直坐标。

经过坐标变换后的大气动力-热力学方程组以及平流扩散方程为^[9]

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial x} + F_u, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial y} + F_v, \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = F_\theta, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{z}} - \frac{u}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial x} - \\ \frac{v}{H - z_g} \frac{\partial z_g}{\partial y} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \bar{z}} = -\frac{H - z_g}{H} \frac{g}{\theta}, \quad (5)$$

$$\frac{dc}{dt} = F_c + Q, \quad (6)$$

其中, $\pi = c_p (p/p_0)^{R/c_p}$ 为气压的Exner函数, $p_0 = 1000 \text{ hPa}$; $\bar{w}$ 为 $(x, y, \bar{z})$ 坐标系中的垂直速度

$$\bar{w} = w \frac{H}{H - z_g} + \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} u \frac{\partial z_g}{\partial x} + \frac{\bar{z} - H}{H - z_g} v \frac{\partial z_g}{\partial y}, \quad (7)$$

在 $(x, y, \bar{z}, t)$ 坐标系中全微分 d/dt 表示为

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial \bar{z}}, \quad (8)$$

F_u 、 F_v 、 F_θ 、 F_c 分别为 u 、 v 、 θ 和 c 的湍流扩散项

$$F_\phi = K_h \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{H}{H - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(K_z \frac{\partial \phi}{\partial \bar{z}} \right), \quad (9)$$

其中, ϕ 代表 u 、 v 、 θ 或 c , K_h 和 K_z 分别为水平和垂直湍流扩散系数, Q 为污染物源强。

2.2 地表能量平衡模式

模式将模拟区域按照土地利用类型分为林地、草地、裸土、水域和建筑物5类,根据不同地表类型在同一网格中所占的比重来决定某一网格的地表热系数 C_T 、反照率 α 、粗糙度 z_0 等地表参数,而后采用地表能量平衡模式计算每个网格的能量通量和格点温度^[10]。

地表温度 T_s 和土壤平均温度 T_2 的预报方程由强迫恢复方法^[11,12] 获得, 表示为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T (R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau} (T_s - T_2), \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T_s - T_2), \quad (11)$$

其中, C_T 为单位面积地表热容量, 是与地表类型有关的参数; τ 为地表温度变化周期, 一般取为 24 h; H 和 LE 分别表示感热通量和潜热通量; 净辐射通量 $R_n = K^* + L^*$, K^* 和 L^* 分别为净短波和净长波辐射通量, K^* 的表达式为

$$K^* = (1 - \alpha) S_0 \cos Z C^{1/\cos Z}, \quad (12)$$

其中, α 为地表反照率; S_0 为太阳常数; Z 为太阳天顶角; C 为削减系数, 取为 0.9; 天顶角 Z 定义为

$$\cos Z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta,$$

其中, φ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬, ω 为时角。

净长波辐射表示为

$$L^* = -\epsilon \sigma T_s^4 + \epsilon_a \sigma T_a^3, \quad (13)$$

其中, T_s 为地表温度; ϵ 为地表放射率; σ 为 Stefan-Boltzman 常数; T_a 为空气温度; ϵ_a 为大气放射率, 可用一经验公式表示

$$\epsilon_a = A(P_a/T_a)^{0.14},$$

其中, P_a 是比湿, $A=1.24$ 为一常数。

感热通量的表达式为

$$H = \rho_a c_p C_H |u| (T_s - T_a), \quad (14)$$

其中, ρ_a 为空气密度, C_H 为拖曳系数^[13]。

潜热通量来自树木和草地的蒸腾 LE_t 、 LE_g 以及土壤和水域表面的蒸发 LE_s 、 LE_w , 分别表示为

$$LE_t = L\rho_a t (R_a - R^*) / (r_a + r_s/I_t), \quad (15)$$

$$LE_g = L\rho_a g (R_a - R^*) / (r_a + r_s/I_g), \quad (16)$$

$$LE_s = L\rho_a s (R_a - R^*) / r_a, \quad (17)$$

$$LE_w = L\rho_a w (R_a - R^*) / r_a, \quad (18)$$

其中, L 为汽化热, t 、 g 、 s 、 w 分别代表树木、草地、土壤和水域在某一网格中所占的比例。 I_t

和 I_g 分别为树木和草地的叶面积指数, R_a 和 R^* 分别为空气比湿和饱和比湿, r_a 和 r_s 分别为气动阻力和地面阻力^[14]。

3 模拟区域与参数选取

为了研究城市下风向绿化带对大气环境、空气质量的影响, 设计了如图 1 东西长 25 km, 南北宽 30 km 的城郊区域, 其中城区面积为 15 km×15 km, 绿化带面积为 25 km×1.5 km。模拟水平网格距 $\Delta x = \Delta y = 500$ m, 垂直网格距下密上疏, 各层高度分别为 0、10、20、40、60、100、150、200、300、400、500、750、1 000、1 250、1 500、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 m, 共 20 层。

城区、郊区、绿化带各自地表类型的比例见表 1, 各地表类型的特征参数见表 2。

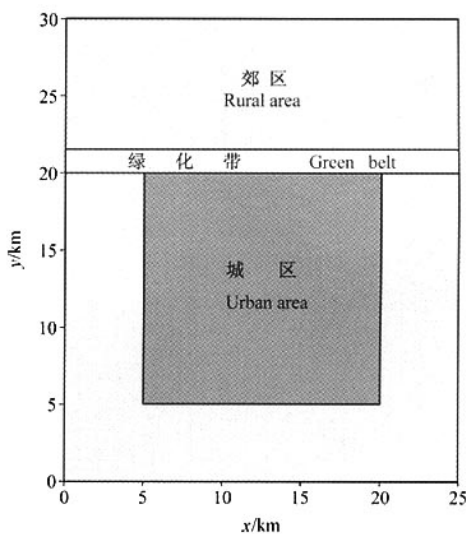


图 1 模拟区域

Fig. 1 Simulated areas

表 1 各区域地表类型比例

Table 1 Land use classification of different areas

%

	林地 Tree	草地 Grass	裸土 Soil	水域 Water	建筑物 Building	建筑物平均高度 (h) Average building height (h) /m
城区 Urban area	5	5	0	0	90	10
郊区 Rural area	10	30	10	0	50	3
绿化带 Green belt	70	10	0	0	20	4.5
加强绿化后的城区 Greentened urban area	15	5	0	0	80	10

表 2 各种地表类型的特征参数
Table 2 Characteristic parameters of different land

	林地 Tree	草地 Grass	裸土 Soil	水域 Water	建筑物 Building
$C_T/10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{J}^{-1}$	1.5	2	2.5	1	$3+0.3(h-2.7)$
α	0.15	0.2	0.25	0.1	0.1
z_0/m	1.0	0.15	0.05	0.0001	$0.1+0.2h$

注： C_T 是单位面积地表热容量； α 是地表反照率； z_0 是地表粗糙度
Note: C_T is the surface heat capacity in unit area; α is surface albedo; z_0 is surface roughness

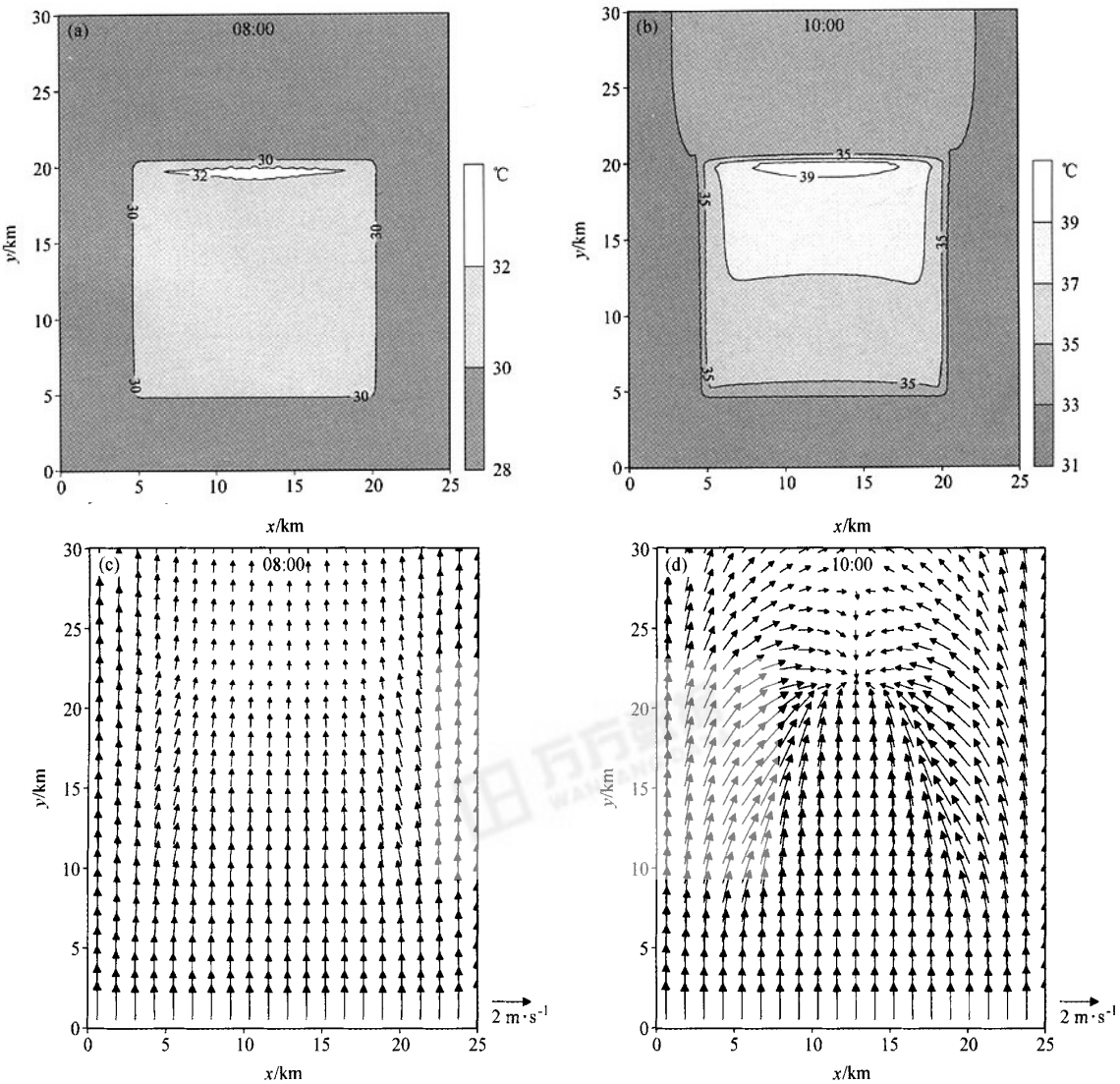


图 2 绿化带建成前气象场特征。(a) 8:00 地表温度场 (单位: °C); (b) 10:00 地表温度场; (c) 8:00 10 m 高水平风场 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) 10:00 10 m 高水平风场
Fig. 2 Characteristics of meteorological parameters field before greenbelt built. (a) 0800 Beijing Standard Time (BT) surface temperature field (units: °C); (b) 1000 BT surface temperature field; (c) 0800 BT 10 m horizontal wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) 1000 BT 10 m horizontal wind field

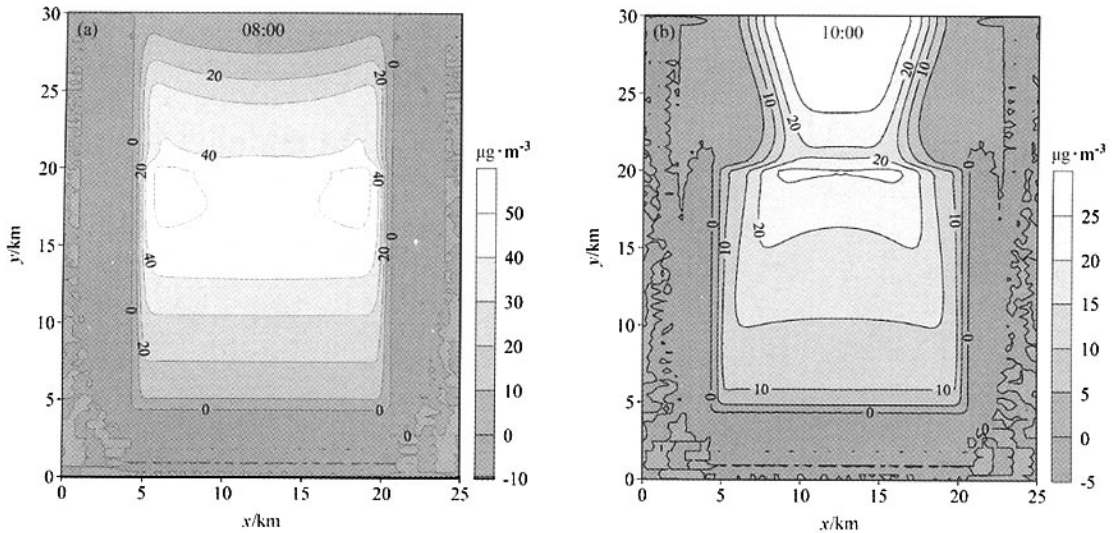


图3 绿化带建成前 (a) 8:00 和 (b) 10:00 地面污染物浓度场特征 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.3 Characteristics of (a) 0800 BT and (b) 1000 BT surface pollutant concentration field before greenbelt built (units: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

4 模拟结果及分析

模拟以南风为例,初始风速随高度呈幂率变化: $v(z)=2.0 \times (z/10)^{0.14} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,初始位温取为水平均匀的稳定层结,土壤初始温度取为 300 K。各区域网格面源源强,郊区和绿化带取为 $0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,城区取为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。模拟时段为夏至日 6:00 到 18:00,分别对 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00 6 个时刻的模拟结果进行了分析。

4.1 数值试验 1

首先模拟了绿化带建成前(即图 1 中绿化带所在位置的土地利用类型改为郊区的土地利用类型)城郊区域的气象场和浓度场。

图 2 给出了 8:00、10:00 的地表温度场和 10 m 高处的水平风场。从图中可以看出,早上 8:00 由于太阳对地面加热还不很强烈,城郊之间存在 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 的温差,风场出现较弱的热岛辐合,模拟区域下风向风速减弱。随着地面不断加热,由于城郊下垫面地表特征的差异,导致城郊温差增大,10:00 时达到 $7 \sim 8^\circ\text{C}$,热岛中心出现在城市下风向,导致明显的热岛环流。12:00 后城郊地表温差逐渐减弱,到 18:00 时下降到 4°C ;位于

城区下风向的热岛中心也逐渐分裂,成为两个对称的小热岛,并且出现相应的热岛环流(图略)。图 3 给出了 8:00、10:00 的地面污染物浓度场,从图中可以看出,随着地表温度的增加,湍流活动增强,地面污染物浓度逐渐减小,到 14:00 达到最小值(图略)。同时污染物也随风场变化出现不同分布,同热岛中心一样,污染物高值区也位于城区下风向,反映了平流输送的结果。

4.2 数值试验 2

模拟绿化带建成后对气象场、空气质量的影响,用绿化带建成后的模拟结果减去建成前的模拟结果表示。

模拟发现一天中 6 个时刻,绿化带附近存在不同程度的污染加重,各时刻污染浓度增加最大分别达到:6%、66%、13%、8%、10%和 5%。上午 10:00 污染加重最为严重,图 4 给出了 10:00 绿化带影响下气象场和浓度场的变化,即绿化带建成后(试验 2)模拟值与建成前(试验 1)模拟值之差。从图 4a 可以看到,绿化带建成后,地表温度下降了 2°C 左右,与建成前的温度场图 2b 相比,在绿化带与城区边缘形成了约 $6^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 的温度梯度,也就是说,绿化带的建成使得绿地与周围的温度梯度增加^[2],形成局部大的气压差,气流从高压流向低压,产生了局地次生环流(图

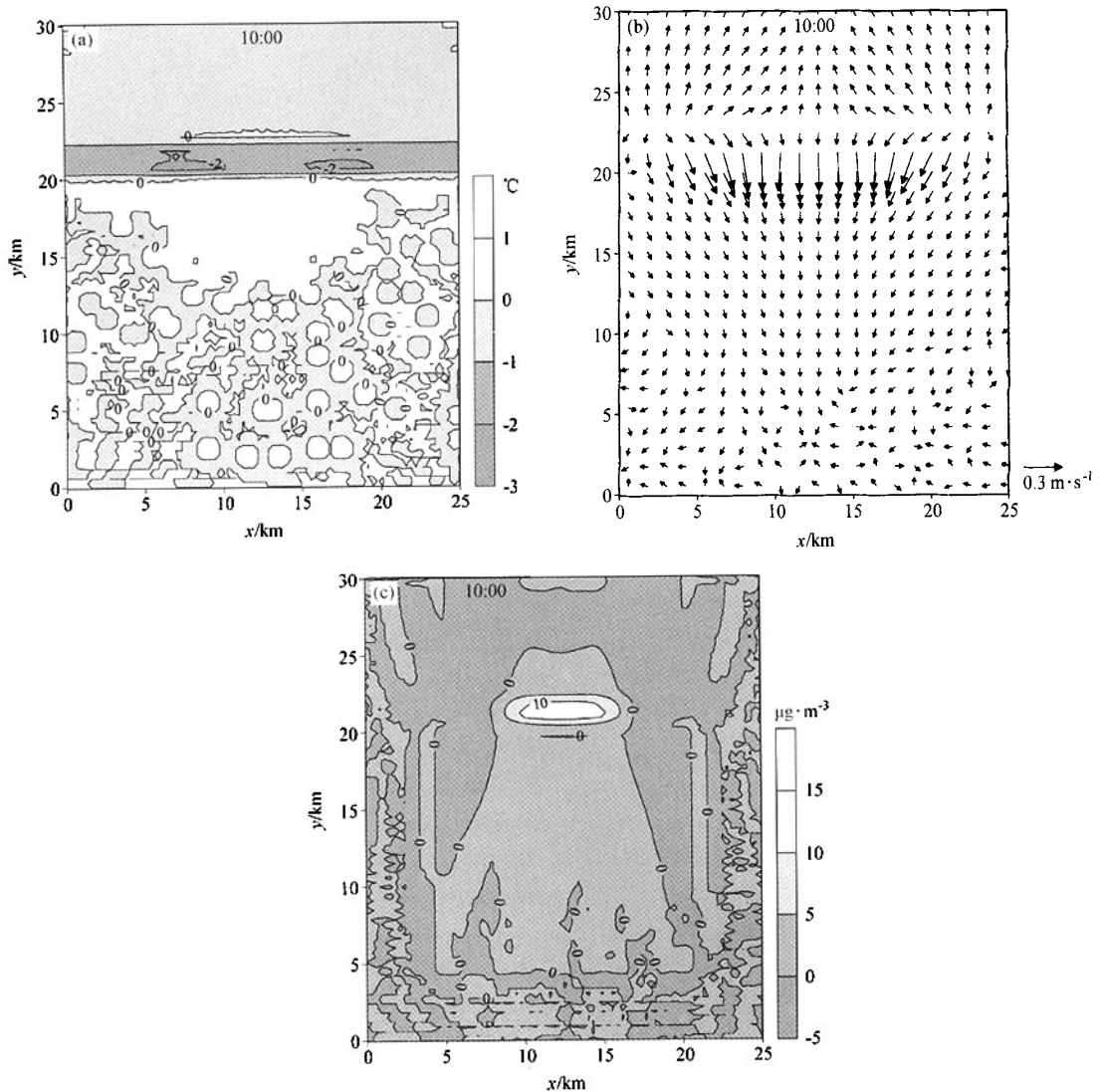


图4 绿化带建成后 10:00 (a) 地表温度场变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$), (b) 10 m 高水平风场变化 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (c) 地面污染物浓度场变化 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。试验 2 与试验 1 模拟值之差

Fig. 4 Variation of 1000 BT (a) surface temperature field ($^{\circ}\text{C}$); (b) 10 m horizontal wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (c) surface pollutant concentration field (units: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) after greenbelt built (the difference between experiment 2 and experiment 1)

4b)。而对位于城区下风向的绿地来说,所产生的这种次生环流的风向是与主导风向相反的,从而使得局地通风不畅,不利于污染物扩散,最终造成局地污染加重(图 4c)。

如 4.1 所述,城市热岛中心在 12:00 之后逐渐分裂,这个现象也反映在绿化带建成后的风场变化中,图 5 给出 12:00 的地表温度场和 10 m 高水平风场的变化,如图所示,次生环流分别指向

两个热岛中心,而由于区域北部中心温度略有增加,故在风场中也产生了微弱的气流辐合。

上面分析了绿化带建成后对气象场、空气质量的影响。建设大型绿地主要目的是为了改善周围的热环境,但模拟表明,即使是降温幅度最大达到 3.7°C 的时刻,绿化带对周围的降温作用也只延伸到下风向的 0.5 km (图 6)。而根据佟华的模拟结果^[2],即使位于城区上风向的绿地,其降

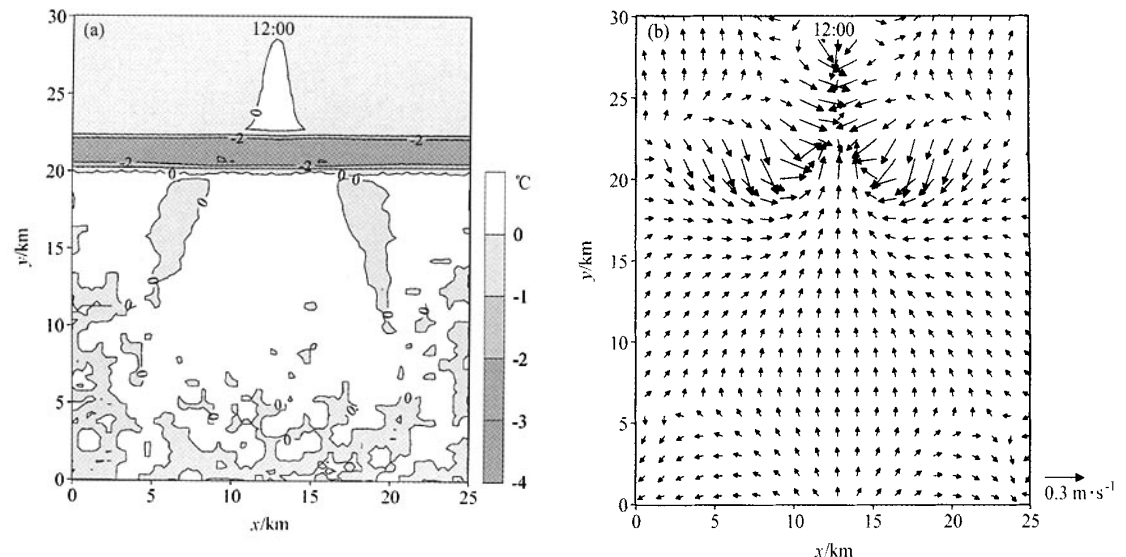


图 5 绿化带建成后 12:00 (a) 地表温度场变化 (单位: °C) 和 (b) 10 m 高水平风场变化 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。试验 2 与试验 1 模拟值之差

Fig. 5 Variation of 1200 BT (a) surface temperature field ($^{\circ}\text{C}$) and (b) 10 m horizontal wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (the difference between experiment 2 and experiment 1)

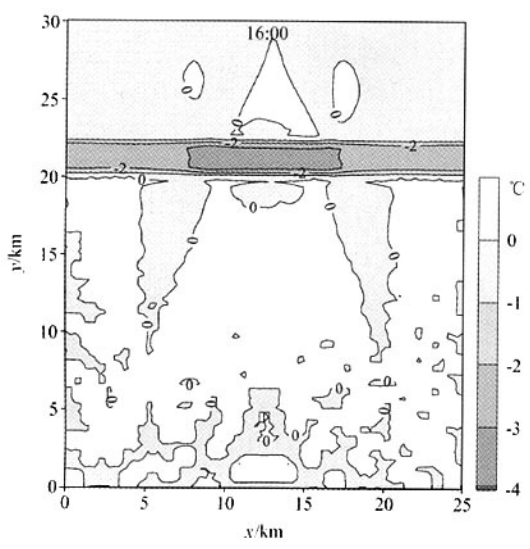


图 6 绿化带建成后 16:00 地表温度场变化 (单位: °C)。试验 2 与试验 1 模拟值之差

Fig. 6 Variation of 1600 BT surface temperature field (units: $^{\circ}\text{C}$) after greenbelt built (the difference between experiment 2 and experiment 1)

温范围也只能达到下风向的 3 km。虽然绿地面积, 风速大小等气象因素会影响绿地的降温范围, 但不难看出, 无论是位于城区上风向还是下风向

的绿地, 其降温作用都不能改变位于城区下风向的热岛强度。

但模拟结果同时表明, 绿地内的降温作用还是较明显的。如若将承建大型绿地的人力、物力投入到对城区的绿化中, 加强城区绿化、增加城区绿地面积, 将会对城区的气象环境有什么影响呢? 对此我们进行了数值模拟。

4.3 数值试验 3

将绿化带恢复为郊区, 根据表 1 可知, 建设绿化带的树木将有 60% 的剩余, 将这部分树木用于加强城区绿化, 平均分配到城区, 则城区树木面积将增加 10% ($25 \text{ km} \times 1.5 \text{ km} \times 60\% / 15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$, 绿化后城区地表类型见表 1), 进行数值模拟试验。

由于绿化降温, 气流辐合减弱, 这一现象存在于一天中各个时刻, 只是风场、浓度场随热岛强度、位置的不同而略有不同。以 10:00 为例, 图 7 给出了城区加强绿化后气象场和浓度场的变化, 即城区加强绿化后 (试验 3) 模拟值与加强绿化前 (试验 1) 模拟值之差。从图中可以看出, 降温分布存在与气温分布相似的趋势, 位于城区下风向的热岛中心降温幅度最大, 达到 1.5°C 。然而由于城区绿化面积增加, 特别是树木会增加地

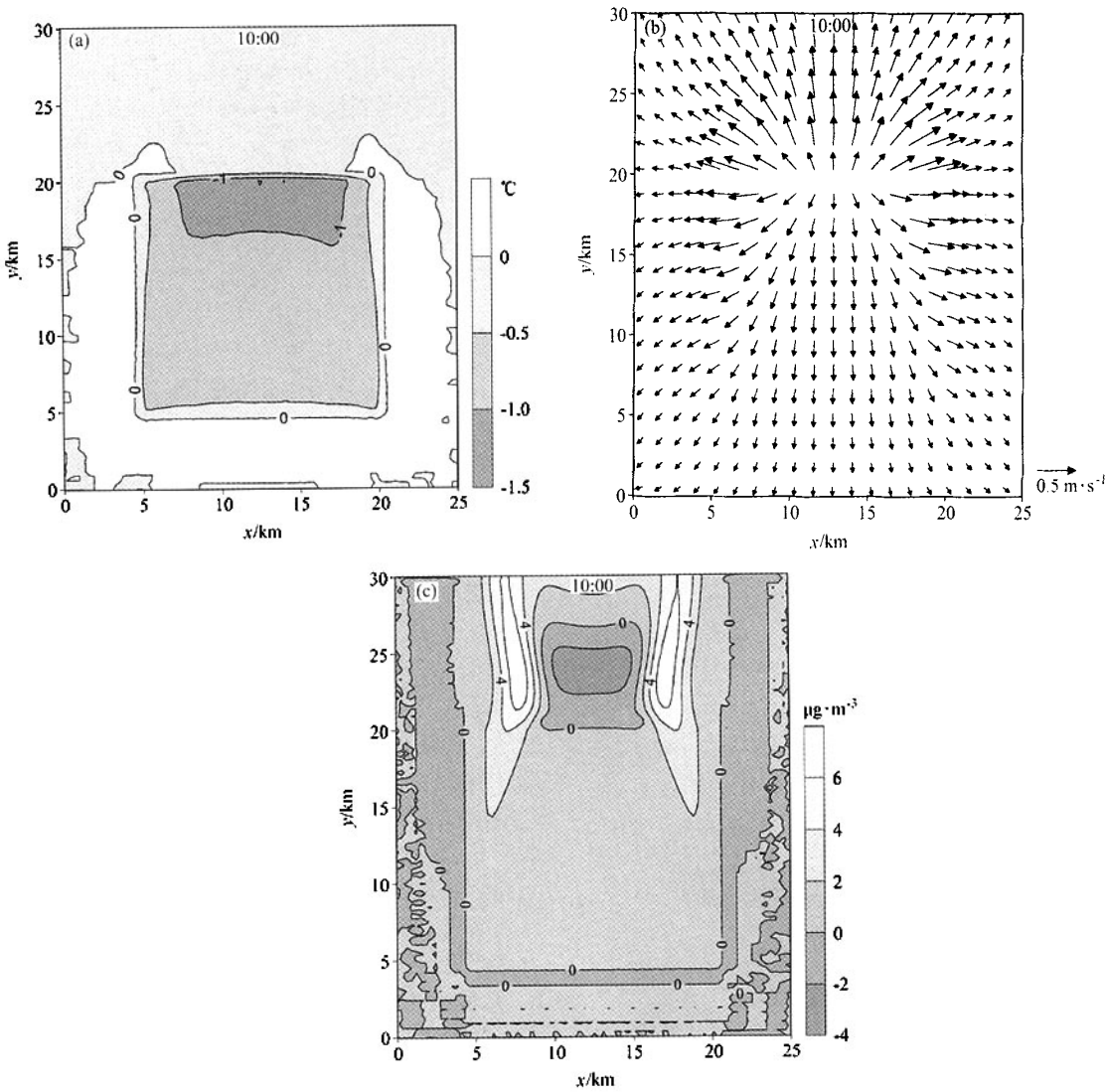


图7 城区加强绿化后 10:00 (a) 地表温度场变化 (单位:℃)、(b) 10 m 高水平风场变化 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 (c) 地面污染物浓度场变化 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。试验 3 与试验 1 模拟值之差

Fig. 7 Variation of 1000 BT (a) surface temperature field (units:℃), (b) 10 m horizontal wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (c) surface pollutant concentration field (units: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) after urban area greentened (the difference between experiment 3 and experiment 1)

表粗糙度, 导致风场气流有所减弱, 与绿化前风场 (图 2d) 相减得到图 7b 所示的风场变化, 其结果是不利于污染物扩散, 造成城区范围出现轻微污染加重 (图 7c)。这一现象以 18: 00 最为明显, 局部污染浓度增加达到 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图略)。

上述模拟仅是从绿化带建成或城区加强绿化后对气象场、浓度场影响的角度进行了研究 (模拟结果有待进一步的现场观测验证), 而对于树

木、植被的生态作用, 例如, 维持碳氧平衡、吸收有害气体、滞尘降尘、杀菌、减噪、抗污等生态功能^[15]均未加以考虑。

5 结论与讨论

本文采用北京大学城市大气边界层模式模拟了绿化带对城市大气环境及空气质量的影响, 同

时做了用于构建绿化带的树木进行城区绿化的对比数值试验, 为园林及城市规划等相关部门提供了参考依据。

数值模拟表明, 当绿化带修建在城区下风向时, 由于绿化带的降温作用, 使得绿地与周围温度梯度增加, 产生局地次生环流; 所产生风向与主导风向相反, 从而使得局地气流不畅, 不利于污染物扩散, 造成局地污染加重。而绿化带的降温作用模拟结果显示, 位于城区下风向的绿化带, 即使是降温幅度最大达到 3.7°C 的时刻, 其降温范围也只延伸到下风向 0.5 km 。上述结果显示, 位于城区下风向的绿化带其降温范围与作用十分有限, 而由于局地气流不畅, 造成了一天中特定时刻的局地污染加重。

为了寻求改善城市热环境的理想方案, 将构建上述绿化带的树木用于加强城区绿化, 进行了数值模拟对比试验。模拟表明, 加强绿化后城区树木增加, 气流有所减弱, 城区范围出现了轻微污染加重。然而从降温的角度来看, 一天中 6 个时刻, 城区绝大部分范围都得到了降温, 降温幅度最大达到 1.6°C , 并且位于城区下风向的热岛中心, 明显降低了热岛强度。这对于减轻夏季高温灾害将起到一定作用, 对于缓解空调用电紧张局面也将有所裨益。例如, 据调查显示, 夏季北京气温每升高 1°C , 用于制冷消耗的电量就会增加 $15.8 \times 10^4\text{ kW}$ 。由此可见将用于构建绿化带的树木用于城区绿化, 将起到天然空调的作用, 节约的能源将是相当可观的。

因此将绿地规划扩大到整个城市区域范围, 大力发展住宅绿地, 公园绿地和街头绿地等多位开放式设计^[15], 将是改善城市环境, 特别是热环境的经济、有效的手段。当绿地覆盖率小于 $40\% \sim 60\%$ 时, 绿地内部结构和空间分布更显示其重要性, 因此在公共绿地布局上, 如能因地制宜、发展立体绿化, 将对整个城市环境改善发挥最佳效应。

参考文献

- [1] Taylor J, Paine C, FitzGibbon J. From greenbelt to greenways: four Canadian case studies. *Landscape and Urban Planning*, 1995, **33**: 47~64
- [2] 佟华. 城市边界层模式的建立发展和应用. 北京大学博士学位论文, 2003, 102~112
- [3] Civerolo K L, Sistla G, Rao S T, Nowak D J. The effects of land use in meteorological modeling; implications for assessment of future air quality scenarios. *Atmos. Environ.*, 2000, **34** (10): 1615~1621
- [4] Sailor D J. Simulations of annual degree-day impacts of urban vegetative augmentation. *Atmos. Environ.*, 1998, **32** (1): 43~52
- [5] Nowak D J, Civerolo K L, Rao S T, et al. A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmos. Environ.*, 2000, **34** (10): 1601~1613
- [6] Kuhn M. Greenbelt and Green Heart: separating and integrating landscapes in European city regions. *Landscape and Urban Planning*, 2003, **64** (1-2): 19~27
- [7] Dimbour J P, Dandrieux A, Dusserre G. Reduction of chlorine concentrations by using a greenbelt. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2002, **15** (5): 329~334
- [8] Khan F I, Abbasi S A. Cushioning the impact of toxic release from runaway industrial accidents with greenbelts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, **13** (2): 109~124
- [9] 桑建国, 温市耕. 大气扩散的数值计算. 北京: 气象出版社, 1992
- [10] Sang Jianguo, Wen Shigeng. *Numerical Calculation of Atmospheric Dispersion* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992
- [10] 佟华, 刘辉志, 胡非, 等. 城市规划对大气环境变化及空气质量的影响. 气候与环境研究, 2003, **8** (2): 167~179
- [10] Tong Hua, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. The impact of city programming on the atmospheric environment and air quality in urban area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese). 2003, **8** (2): 167~179
- [11] Bhumralkar C M. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *J. Appl. Meteor.*, 1975, **14**: 67~100
- [12] Blackadar A K. Modeling the nocturnal boundary layer, Proc. Third Symp. on Atmospheric Turbulence Diffusion and Air Quality. Boston, Amer. Meteor. Soc., 1976, 46~49
- [13] Stull R B 著. 杨长新译. 边界层气象学导论. 北京: 气象出版社, 1991
- [13] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Yang Changxin translated. Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [14] Jacquiemini B, Noilhal J. Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set. *Bound. -Layer Meteor.*, 1990, **52**: 93~134
- [15] 王保忠, 王彩霞, 何平, 等. 城市绿地研究综述. 城市规划汇刊, 2004, (2): 62~68
- [15] Wang Baozhong, Wang Caixia, He Ping, et al. Review of urban greenbelt research. *Urban Planning Forum* (in Chinese), 2004, (2): 62~68