

城市草地对局地气象环境影响的个例分析*

黄容, 马艳, 郭丽娜, 郝燕, 徐晓亮

(青岛市气象局, 山东 青岛 266003)

摘要:在青岛市规划局 2008 年发布的城市总体规划(2006—2020 年)的基础上,利用城市尺度边界层大气数值模式模拟在有无城市草地和在不同城市草地面积条件下青岛环胶州湾地区气温、风速的变化特征及其对大气环境的影响。数值分析表明:城市草地的设置将使城市气温降低,缓解城市热岛效应;使地面风速增大,从而增强区域的大气扩散能力,减小污染物的质量浓度。城市草地面积的显著减小,会导致局部地区气温升高、风速下降、污染物质量浓度加大。影响气温、风速变化的区域主要集中在设置和减少草地地区附近。

关键词:城市草地;数值模拟;气象环境

中图分类号:P463.3

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2011)02-0148-09

城市草地的设置对保护生物多样性、过滤污染物、防止水土流失等有重要的意义,同时有利于改善局地微气象条件和大气环境,达到调节城市气温、提高大气扩散能力的目的^[1]。2008 年 9 月青岛市启动了新一轮城市总体规划(2006—2020 年),全面融入“环湾保护、拥湾发展”的战略思想,拟将环胶州湾区域规划建设成为生态型、花园式的城市组群。在此概念规划中提出应依托水体、农田、山体、道路等规划建设环胶州湾城市生态间隔区,严格控制环胶州湾城市组群的连绵开发趋势,防止城镇空间的随意扩张和无序蔓延。本研究在青岛市规划局 2008 年发布的城市总体规划的基础上,利用城市尺度边界层大气数值模式(RBLM)模拟分析了在不同城市草地布局条件下青岛环胶州湾地区气温、风速、大气污染物浓度的变化,以此来说明城市草地对气象环境的影响。

1 数值模式简介以及数值试验设计

1.1 城市尺度边界层大气数值模式简介

城市尺度边界层大气数值模式(RBLM)是由北京市气候中心和南京大学联合开发的一个三维非静力区域数值和大气扩散预报模式^[2-3]。该模式假设基本状态为水平均匀、定常、准静力平衡的,状态标量定义为基本状态量与扰动量之和。除大气基本连续方程、动量方程、热流量方程外,水汽、污染物等的标量方程为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(K_{qh} \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{qh} \frac{\partial q}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{qv} \frac{\partial q}{\partial z}) + S_q \quad (1)$$

式中, q 为水汽、云水、雨水或污染物质量浓度; t 为时间; x, y, z 分别为模式东西向、南北向、垂直方向笛卡尔坐标; u, v, w 分别为大气水平东西向、水平南北向、垂直方向风速; K_{qh}, K_{qv} 分别为水平、垂直标量交换系数; S_q 为各标量的源汇项。

湍流参数化方案采用湍流动能(TKE)的 1.5 阶闭合方案,引入湍流动能 E 的预报方程:

* 收稿日期:2010-06-01

资助项目:青岛市“环湾保护、拥湾发展”战略研究项目——胶州湾气象变化和城市规划关系研究(1392 号项目第六专题);中国气象局新技术推广项目——城市规划气候可行性论证推广应用(CMATG2010M01)

作者简介:黄容(1976-),女,工程师,硕士,主要从事天气气候学方面研究。E-mail:hrjjj2007@hotmail.com

(杜素兰 编辑)

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & -\left(u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z}\right) - \frac{g}{\theta} K_{\theta h} \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \right] - \frac{C_e}{l} E^{2/3} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_e \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_e \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial E}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $E=0.5(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2})$; g 为重力加速度; θ 为位温; $K_{\theta h}$ 为水平热量交换系数; K_m 为动量交换系数; K_e 为湍流交换系数; 湍流耗散项中的参数 C_e 在模式最低层取为 3.9, 在模式其它层取为 0.93; l 为长度尺度。

云物理过程采用 Kessler(1969)暖云雨参数化方案。地表通量根据 Businger(1971)^[4] 和 Byun(1990)^[5] 的方案作为湍流扩散项、热量扩散项和水汽扩散项的下边界条件进入大气模式。

城市下垫面的作用考虑了建筑物拖曳参数化^[6], 即认为城市结构是气流可以穿透的多空介质, 将网格内建筑物的迎风面积和网格内空气体积之比定义为城市建筑表面积指数 $A(z)$, $A(z)$ 随高度变化。同时在 u 、 v 分量方程和湍能方程中引入城市建筑物阻尼项:

$$F_{bu} = -\frac{1}{2} \eta C_d A(z) u (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$F_{bv} = -\frac{1}{2} \eta C_d A(z) v (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (4)$$

以及扰动影响项:

$$P_{EB} = \frac{1}{2} \eta C_d A(z) (|u|^3 + |v|^3) \quad (5)$$

$$P_{eb} = \frac{3}{4} \frac{\epsilon}{E} \eta C_d A(z) (|u|^3 + |v|^3) \quad (6)$$

式中, η 是每个网格内建筑物面积比例, 根据 Raupach(1992)的风洞试验研究结果, 取拖曳系数 C_d 为 0.4。

人为热源参数化^[7-8]方案考虑人为热量的非均匀排放对地表能量平衡以及空气中热量守恒的影响。在模式中人为热源主要是通过在地表温度和气温的预报方程添加人为热源项来实现的, 分别为大气热量守恒方程:

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial \theta'}{\partial x_j} \right] + S_R + Q_{anth} \quad (7)$$

以及地温预报方程:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T (R_n - H - LE + Q_{anth}) - \frac{2\pi}{\tau} (T_s - T_2) \quad (8)$$

式中, S_R 为热源的源汇项; Q_{anth} 表示人为热源项; C_T 为土壤植被热系数; R_n 为到达地表的净辐射; H 为感热通量; LE 为潜热通量; T_s 为地表温度, T_2 为深层土壤温度; k 、 π 、 τ 均为常数。

模式采用地形跟随坐标系, 时间差分采用蛙跳格式以及前项差分格式。该模式较细致地考虑了城市复杂下垫面特征对边界层大气结构的影响, 适用于对城市区域、山区和海陆等复杂下垫面条件下对边界层气象要素场和空气污染物的预报。

1.2 数值试验方案

1.2.1 方案 1

利用高分辨率的 Landsat TM 卫星 2006 年 10 月 27 日的探测资料反演得到青岛胶州湾沿岸土地利用类型、地表反照率、叶面积指数等参数, 作为接近现状情况的下垫面资料对现状进行模拟, 称为 Case 1。

1.2.2 方案 2

为研究城市草地的设置对环胶州湾气象环境的影响, 本试验方案参照了青岛“环境保护、拥湾发展”概念规划中生态隔离廊道的设置(如图 1 黑色区域), 主要设置了西端洋河生态间隔区、西北端大沽河、红岛西侧河生态间隔区、北端墨水河生态间隔区、东北端白沙河生态间隔区、东端娑山、李村河、海泊河生态间隔区, 在 Case 1 的土地利用类型基础上将模拟范围内相应区域的土地利用类型改为环胶州湾总面积为 256 km² 的城市草地。同时为考察城市草地的设置对大气污染扩散能力的影响, 在模拟中还在黄岛炼油附近设置了 1 个

SO₂排放的污染源(图 1a 白点),排放高度在 150 m 左右,该方案称为 Case 2。

1.2.3 方案 3

城市布局的规模对大气气象环境也有一定的影响^[9],为考察城市草地设置面积的缩小对环胶州湾地区气象环境的影响,将环胶州湾城市草地的面积减小 70%(草地面积约 74 km²),其中胶州湾东侧的小片城市草地完全取消(图 2 白色区域),称为 Case 3。其余模拟条件与 Case 2 一致。

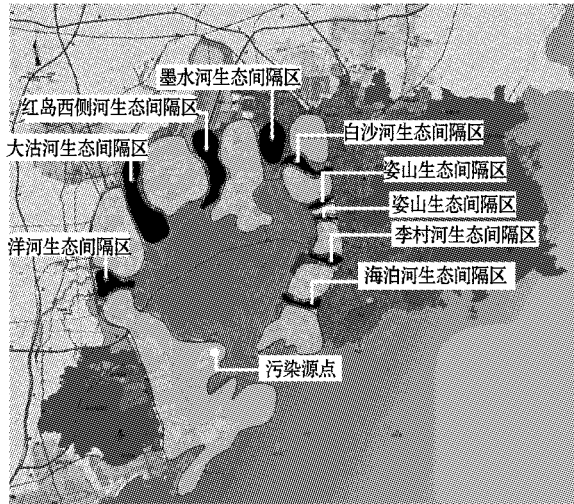


图 1 规划设立城市草地范围

Fig. 1 Sketch showing the urban grassland extent



图 2 草地面积缩小后的范围示意图

Fig. 2 Sketch showing the reduced urban grassland

1.3 模式区域与初始气象条件

本数值试验模拟区域的水平范围为 80 km×70 km,中心经纬度为 36°7'22"N, 120°21'7"E,水平分辨率为 1 km×1 km。模拟的初始气象条件分别为 1 月(代表冬季)和 8 月(代表夏季)02:00, 08:00, 14:00, 20:00 四个时次的气候平均值。具体数据如表 1 所示。对每个方案分别计算了以 1,7 月 08:00 时与 20:00 时为初始气象条件的 4 组试验,模式积分时间为 3 h,输出分析了分别代表白天(11:00)和夜间(23:00)的模式结果。

表 1 初始气象计算条件

Table 1 Initial meteorological conditions for the computation

季 节	时 次	风向/°	风速/m·s ⁻¹	气温/°C	相对湿度/%
冬 季	02:00	345	4.7	-2.3	75
	08:00	286	3.8	-3.0	77
	14:00	285	5.1	0.8	63
	20:00	287	5.1	-1.0	38
夏 季	02:00	170	2.6	24	96
	08:00	80	3.4	24.9	94
	14:00	153	3.9	27	89
	20:00	151	2.8	24.9	95

2 数值模拟结果分析

2.1 有无城市草地对局地气象环境的调节效应分析

城市草地具有缓解城市热岛效应^[10]、改善空气质量^[11]的功能。本节通过数值模拟对比分析无城市草地的现状模拟 Case 1 与设置了 256 km²城市草地的 Case 2 来研究城市草地的设置对环胶州湾地区近地面气温、风速以及大气污染物 SO₂分布的影响情况。图 3 为环胶州湾地区夏季近地面气温的变化情况,图中数据为 Case 2 减去 Case 1 的地面气温结果。

由图 3 可知,设置了 256 km²的城市草地之后,由于草地反射率较大,获得的太阳辐射较小,且草地地表湿度大、潜热大、蒸散耗热量大^[12-13],使得城市草地附近夏季气温大幅降低,环胶州湾地区存在大面积的温度负值区,明显降温地区主要集中在草地隔离区的周边,降温区的分布和城市草地隔离区的位置非常接近。夏季白天,环胶州湾地区的地面气温降温幅度大于 0.5 °C 的面积为 183 km²,平均降温幅度 1.1 °C;夏季夜间,气温降幅大于 0.5 °C 的范围为 185 km²,平均降温幅度为 2.1 °C,比白天显著,且降温幅度最大可达 3.0 °C。这些数据说明,如果在未来城市规划中设立一定面积的城市草地,将有效地减小由于城市化进程带来的热岛效应,缓解夏季暑热。

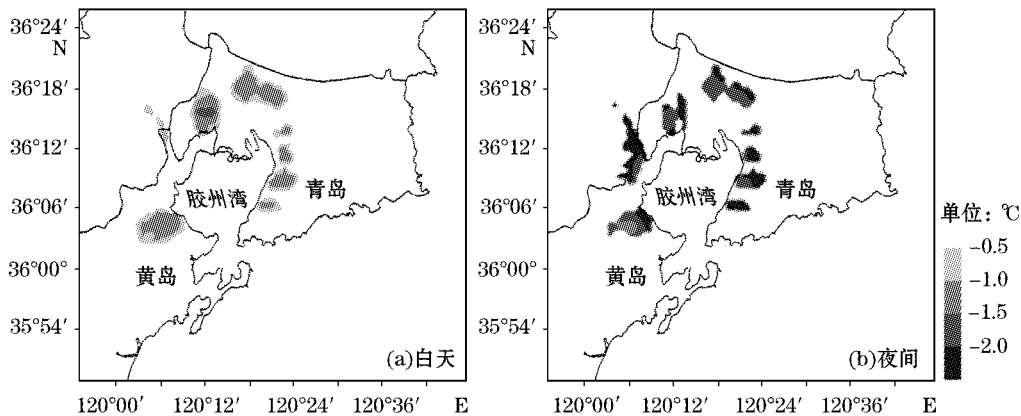


图 3 Case2-Case1 夏季地面气温差

Fig. 3 The air temperature difference between Case 1 and Case 2 in summer

图 4 给出了设置城市草地之后冬季、夏季环胶州湾地区的风速变化情况。草地的存在使得地表粗糙度相对较低,对空气流动的阻尼作用减弱,且相对开敞的空间具有更大的空气流动潜力,从而使邻近地区风速增大。由图 4 可知,城市草地的设置将使其附近区域的地面风速增加,平均风速增幅在 0.5 m/s 以下。其中,夏季白天风速增加幅度大于 0.25 m/s 的区域为 200 km²,平均风速增加幅度为 0.46 m/s。冬季白天风速增加幅度大于 0.25 m/s 的区域为 118 km²,平均风速增加幅度为 0.47 m/s,风速增幅最大达 1.2 m/s。说明城市绿地的设置使得冬季地面风速增加,这将改善胶州湾沿岸冬季由于逆温层结的存在而导致的较差的大气扩散条件,减轻城区由于燃煤取暖造成的大气污染。

增加城市草地后,环胶州湾地区 SO₂ 的质量浓度减小(图 5),减小的区域在主导风向的下风方向,平均 SO₂ 质量浓度减小的幅度在 0.12~0.22 μg/m³。其中冬季白天 SO₂ 质量浓度的减小最显著,约有面积为 136 km² 的区域 SO₂ 质量浓度减小大于 0.1 μg/m³,平均降幅为 0.22 μg/m³,最大降幅为 0.6 μg/m³。说明城市草地的设置有利于改善大气扩散条件,缓解大气污染,提高空气质量。

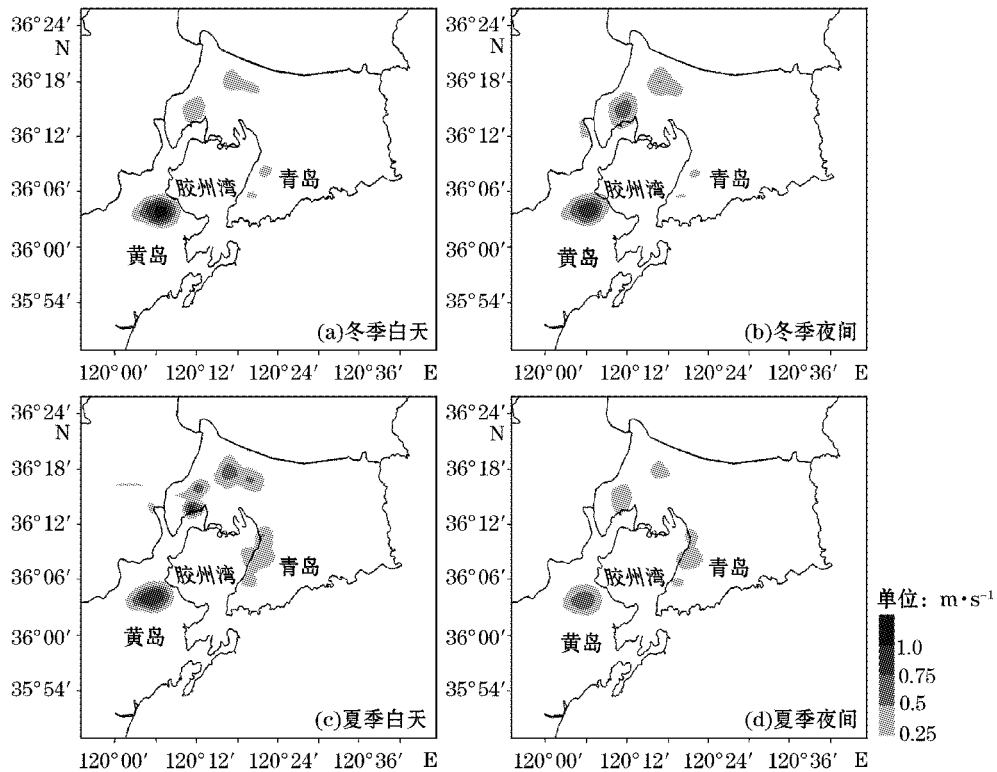


图 4 Case2-Case1 地面风速差值

Fig. 4 The wind speed difference between Case 1 and Case 2

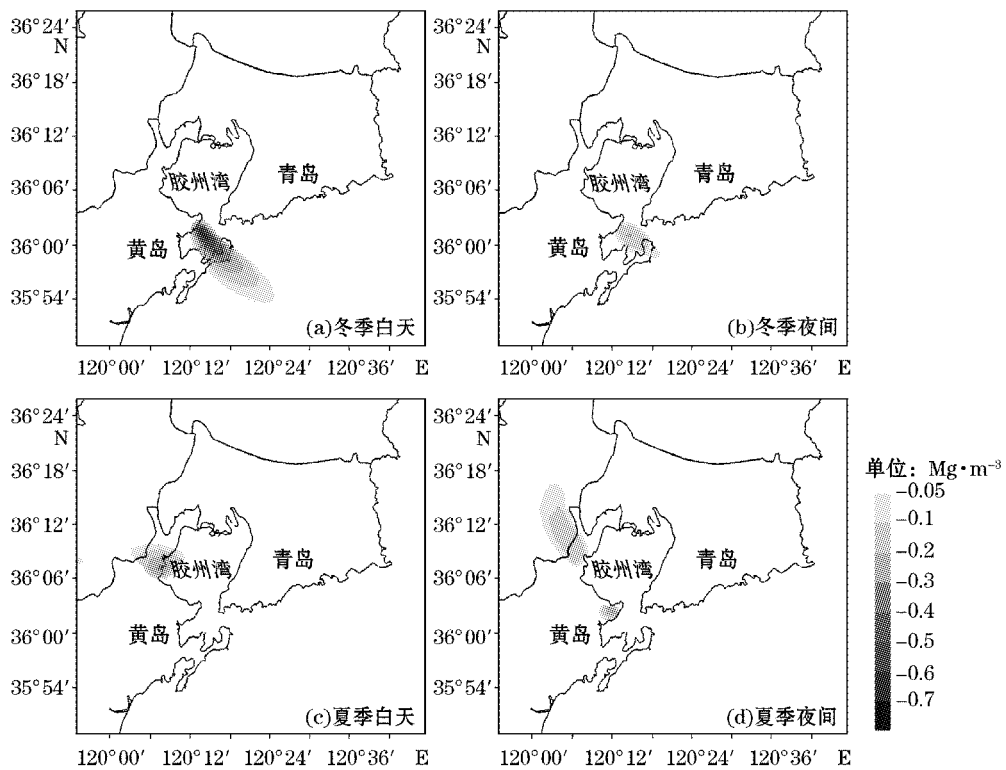


图 5 Case2-Case1 SO_2 质量浓度差值

Fig. 5 The SO_2 mass-concentration difference between Case 1 and Case 2

2.2 城市草地面积减少 70% 的局地气象环境效应分析

为具体考察城市草地面积的大小对环胶州湾地区气象环境的影响,对比分析了 Case 3 与 Case 2 之间近地面气温、风速和 SO_2 质量浓度的变化情况。

城市草地面积减小 70% 后,环胶州湾地区近地面气温升高(图 6),对城市气温造成的影响夏季比冬季显著,夜晚比白天显著。明显增温区集中在草地面积减小或者消失的周边地区。尤其是夏季夜晚,升温影响区域达 179 km^2 ,平均升温达 $1.93 \text{ }^\circ\text{C}$;对冬季白天的气温影响最小,温度增幅大于 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 的范围只有 45 km^2 ,但平均增温达 $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。分析表明城市规划中城市草地面积的显著减小将导致周边气温较明显的升高,较小面积的城市草地的设置不能抵消由于城市化进程而导致的城市增温效应。

图 7 是 Case 3-Case 2 地面风速的分布情况。城市草地面积显著减小后临近区域风速减小,风速的减小白天较夜晚明显,平均风速降幅在 $0.4 \sim 0.51 \text{ m/s}$ 。对夏季白天的影响最大,风速减小大于 0.25 m/s 的范围达 244 km^2 ,平均风速降幅为 0.47 m/s ,最大降幅达 1.2 m/s 。夏季夜晚风速减小的幅度和范围最小,风速减小大于 0.25 m/s 的范围为 83 km^2 ,平均风速降幅为 0.4 m/s 。可见设立足够面积的城市草地区域对提高风速有非常重要作用。

城市草地区域面积显著减小以后 SO_2 质量浓度在全年白天和夜晚都有小幅增加(图 8),其中冬季白天增加最为显著,而冬季夜间最不明显。冬季白天在黄岛假设污染源附近主导风向的下风方有 89 km^2 的区域 SO_2 质量浓度增幅大于 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,平均增幅为 $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在夏季,同样在假设污染源附近主导风向的下风方有较小范围的区域 SO_2 质量浓度增加,平均增幅在 $0.13 \sim 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。说明生态隔离廊道草地面积的显著减小会不利于污染物的扩散。

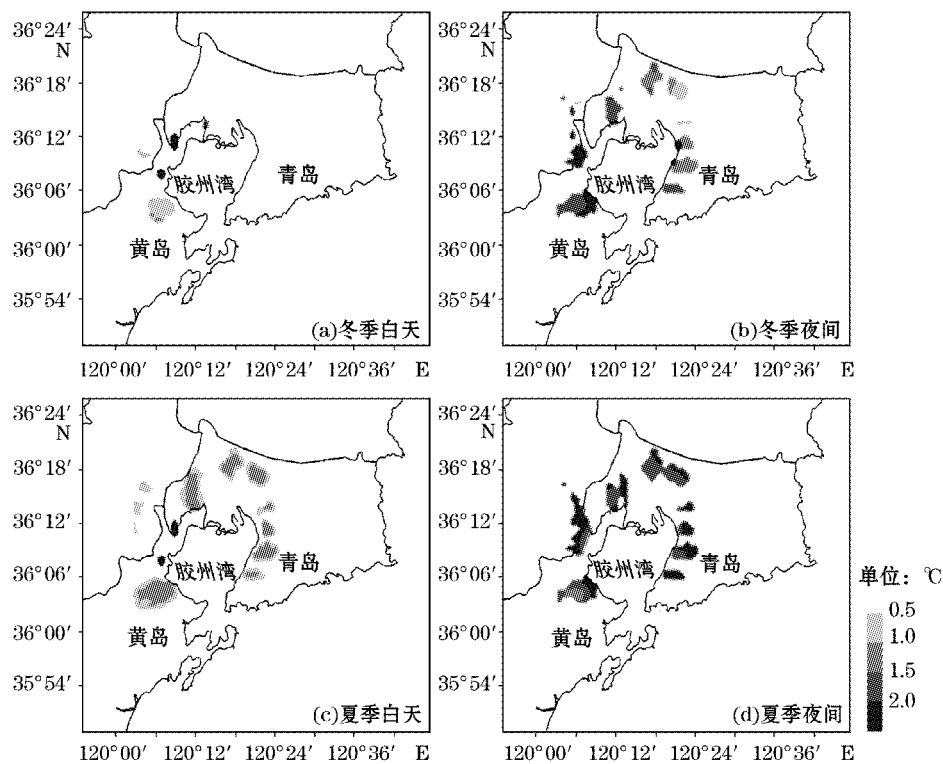


图 6 Case3-Case2 地面气温差值

Fig. 6 The surface air-temperature difference between Case 1 and Case 2

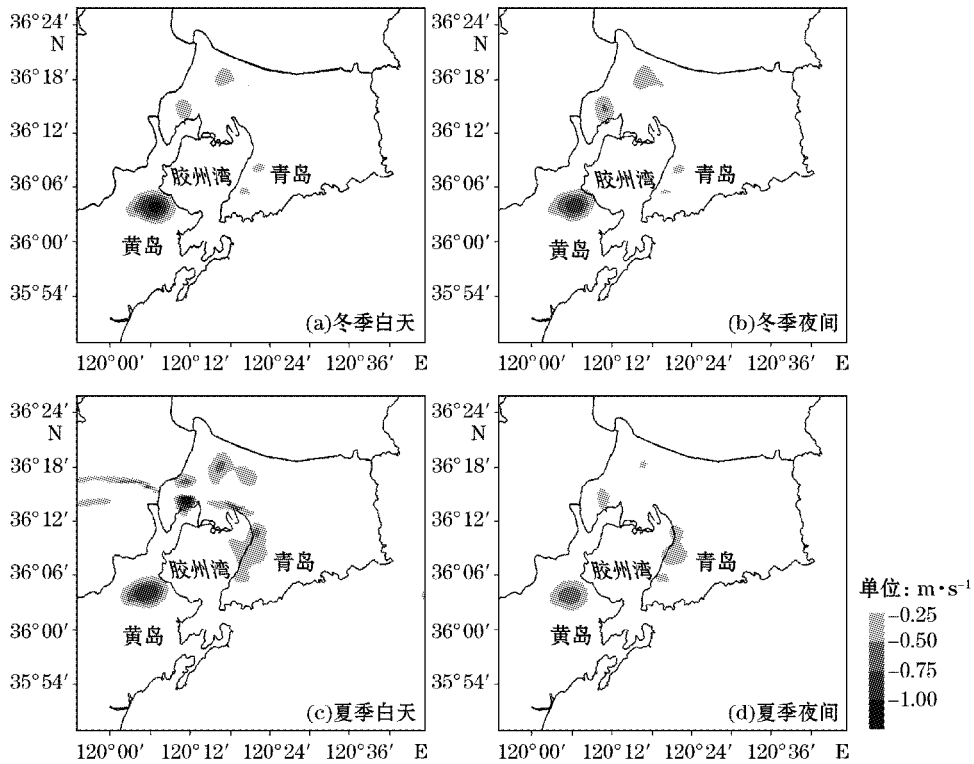


图 7 Case 3-Case 2 地面风速差值

Fig. 7 The surface wind speed difference between Case 1 and Case 2

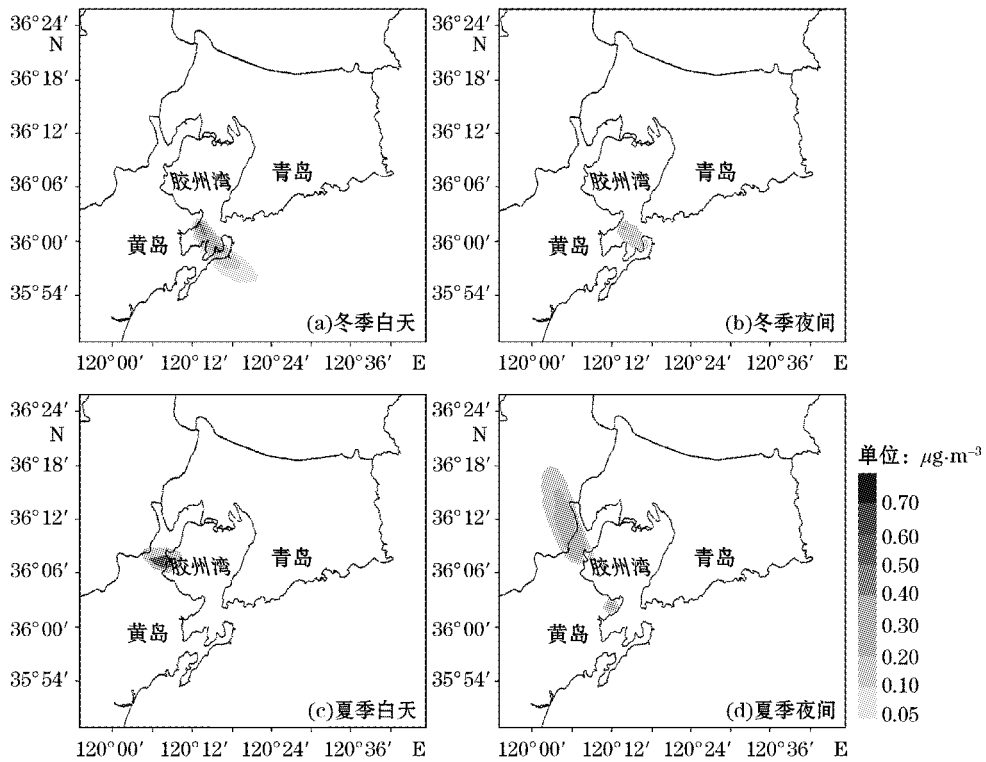


图 8 Case 3-Case 2 SO_2 浓度差值

Fig. 8 The SO_2 concentration difference between Case 1 and Case 2

3 结 语

本研究运用城市尺度边界层大气数值模式分别对青岛环胶州湾土地利用现状情况、基于青岛市规划局2008年发布的城市总体规划(2006—2020年)的城市生态廊道设置为城市草地的情况以及将城市草地设置面积减小70%的情况进行了模拟,通过对比分析数值试验结果来研究环胶州湾的城市草地布局对城市气象环境的影响。

数值试验对比分析表明:城市草地的设置对夏季城市气温的降低有较大作用,城市草地设置的范围附近约180 km²的区域平均温度降幅在1.1~2.1℃。城市草地的设置使设置区域附近的地面风速增大,平均风速增加幅度在0.4~0.5 m/s。风速的增加提高了区域的大气扩散能力,对SO₂质量浓度的分析表明,增加城市草地后,污染物的质量浓度有所减小,减小的范围在主导风向的下风方向,平均SO₂质量浓度减小的幅度在0.12~0.22 μg/m³。城市草地的设置以及草地面积的保持将起到有效改善城市气候环境、减弱城市热岛效应、保护大气环境的作用。

数值试验对比分析表明:城市草地面积的显著减小将导致环胶州湾地区的气温升高,明显增温区集中在草地面积减小或者消失的周边地区,说明设置小面积的城市草地对于由城市化进程导致的城市增温效应并没有缓解作用。同时,城市草地面积的显著减小将导致城市相关区域风速减小,从而导致大气扩散能力恶化、污染物质量浓度增加。划定生态草地保护绿线、维护生态廊道功能将是维持气候适宜性的有效办法。

参考文献(References):

- [1] WANG G T, WANG X Y, MIAO S G, et al. The studying and application of the multi-scale evaluation system about atmospheric environment effect on urban planning [J]. Science in China, Series D, 2005, 35(suppl.): 145-155. 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用[J]. 中国科学, D辑, 2005, 35(增刊): 145-155.
- [2] XU M, JIANG W M, JI CH P, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(Suppl.): 61-68. 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 北京地区气象环境数值模拟试验[J]. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 61-68.
- [3] FANG X Y, JIANG W M, MIAO S H G, et al. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 103-112.
- [4] BUSINGER J A, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28: 181-189.
- [5] BYUN D W. On the analytical solutions of flux-profile relationships for the atmospheric surface layer [J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 29: 652-657.
- [6] JIANG W M, WANG Y W, LIU G, et al. Multi-scale urban boundary layer modeling system[J]. Journal of Nan Jing University: Natural sciences, 2007, 43(3): 221-237. 蒋维楣, 王咏薇, 刘罡, 等. 多尺度城市边界层数值模式系统[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2007, 43(3): 221-237.
- [7] JIANG W M, CHEN Y. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(1): 37-47. 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 37-47.
- [8] HE X F, JIANG W M, CHEN Y, et al. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50, (1): 74-82. 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 74-82.
- [9] WANG Y W, JIANG W M, GUO W L, et al. Numerical study of the urban scale and layout effect on atmospheric environment [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(1): 88-100. 王咏薇, 蒋维楣, 郭文利, 等. 城市布局规模与大气环境影响的数值研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(1): 88-100.
- [10] FAN L Y, LIU S H, LIU Z H, et al. The impact of greenbelt on urban atmospheric environment and air quality[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(1): 85-93. 范丽雅, 刘树华, 刘辉志, 等. 绿化带对城市大气环境及空气质量的影响 [J]. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 85-93.

- [11] TONG H, LIU H Z, HU F, et al. The impact of city programming on the atmospheric environment and air quality in urban area[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(2): 167-179. 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[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(2): 167-179.
- [12] ZHU X C, ZHAO G X. Local influence of underlying surface on meteorological elements and associated climatic effect [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 760-764. 朱西存, 赵庚星. 局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 760-764.
- [13] WANG Y W, JIANG W M, JI C P, et al. Simulation of the land-use change effect on urban meteorological environment [J]. *Journal of Nan Jing University: Natural sciences*, 2006, 42(6): 562-581. 王咏薇, 蒋维楣, 季崇萍, 等. 土地利用变化对城市气象环境影响的数值研究[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2006, 42(6): 562-581.

A Case Analysis of Urban Grassland Impacts on Local Meteorological Environments

HUANG Rong¹, MA Yan¹, GUO Li-Na¹, HAO Yan¹, XU Xiao-Liang¹

(*Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China*)

Abstract: Based on the over-all plan (2006—2020) issued by Qingdao Planning Bureau in 2008, a urban atmospheric boundary layer model is used to simulate the variations of urban atmospheric temperature, and wind speed with their effects on atmospheric environments around the Qingdao Jiaozhou Bay under different urban ground conditions with various pieces of grassland or without any grassland. It is shown from numerical analysis that the urban grassland setting is helpful decrease the air temperature and depress the effect of urban heat island. It also makes wind speed decrease, improves the the regional atmospheric diffusion ability, and reduces the pollutant mass concentration. On the other hand, the significant decrease of the urban grassland area will result in air temperature increase, wind speed decrease, and pollutant mass concentration heightening in some local area. The regions effected by the temperature and wind speed are mainly located at the places where the grassland area is enlarged or lessened.

Key words: urban grasslands; numerical simulation; meteorological environments

Received: June 1, 2010