

土地利用/覆被的剧烈变化对深圳市气温的影响

连婧慧 王钧 曾辉[†]

北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: zengh@pkusz.edu.cn

摘要 基于 Landsat 遥感影像解译得到 1986 年和 2011 年深圳市土地利用/覆被数据, 采用中尺度气候模式 WRF/UCM, 在较高分辨率的地形资料和城市冠层参数支持下, 将两个时期的土地利用/覆被作为模式强迫参量, 分别进行两组数值模拟试验。将模拟结果与自动气象站点观测数据进行对比和验证, 发现 WRF 模式能够较准确地反映深圳市月平均气温西高东低的空间分布特征。1986—2011 年, 深圳市在快速城市化进程中发生大规模的土地利用/覆被变化, 引起近地表气温整体上呈现增高趋势。其中, 7 月增温幅度(0.91℃)普遍大于 1 月(0.42℃), 各种自然植被覆盖型用地转变成城镇建设用地的升温幅度大多为 0.70~1.57℃。主要原因是城镇建设用地扩张导致地表反照率减小, 净辐射和感热通量增加, 潜热交换变弱。

关键词 WRF/UCM模式; 土地利用/覆被变化; 近地表气温; 深圳

中图分类号 P404

Impacts of Dramatic Land Use Change on the Near-Surface Air Temperature in Shenzhen

LIAN Jinghui, WANG Jun, ZENG Hui[†]

School of Urban Planning and Design, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: zengh@pkusz.edu.cn

Abstract Based on the Landsat remote sensing images of 1986 and 2011, higher resolution terrain data and 2-D urban fraction values, the impact of land use and land cover change (LUCC) on the near-surface air temperature is investigated for Shenzhen by carrying out two sets of numerical experiments using the weather research and forecasting model (WRF) coupled with the Noah urban canopy model. Comparison with measured near-surface air temperatures of 40 ground-based atmospheric observatories in the region shows a good agreement between observed and simulated data for the simulation periods. The results indicate significant contributions of urban sprawl and accompanying LUCC to the near-surface air temperature. Simulations suggest that LUCC has caused average temperatures with an increase of up to 0.42℃ in January and 0.91℃ in July respectively. The conversion from natural vegetation covers into urban and built-up area results in a decrease in surface albedo and thereby enhances the surface net solar radiation and the sensible heat flux, which leads to the most obvious warming effect.

Key words WRF/UCM model; land use and land cover changes (LUCC); near-surface air temperature; Shenzhen

温室气体排放和土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)已经成为 20 世纪中期以来气候变暖的主要原因^[1]。LUCC 不仅可以通过改变生物地球化学循环使大气中的化学成分发生变化^[2], 还可以通过改变地表反照率、粗糙度、辐射

率以及土壤湿度等陆面物理属性和形态特征, 改变地-气系统辐射收支、能量平衡和水文循环等过程, 从而对局地天气和气候产生影响^[3-4]。作为全球气候变化的驱动者和响应者, 城市生态系统与全球生物地球化学循环和气候变化关系密切^[5]。城市下垫

深圳市孔雀计划海外高层次人才技术创新项目(KQCX20140521145956269)资助

收稿日期: 2016-03-23; 修回日期: 2016-04-12; 网络出版日期: 2017-03-13

面中建筑物、街区道路等的非均匀分布导致城市气象要素扩散、传输和转换具有独特的机制,形成与人类活动密切相关的边界层结构和小尺度气候特征^[6]。随着经济发展、人口增长与城市规模的不断扩大,由LUCC引发的城市气候效应日益凸显^[7]。其中,城市热岛效应即为建成区扩张对城市及其周边区域气候影响的最好例证^[8]。

迄今为止,很多学者针对LUCC与气候变化关系进行研究。在大多数研究中,主要依据气象台站观测资料,分析城市化对气温、降水等气象要素的影响,同时借助遥感影像反演,通过城市热岛效应来反映城市化造成的温度上升^[9-11]。由于地-气系统的复杂性,数值模式可作为研究LUCC对气候影响及其作用机制的重要手段。

WRF (Weather Research and Forecasting)模式是目前全球应用广泛的中小尺度数值模式之一,应用于城市天气系统、气候变化和空气污染等的研究和业务预报中^[12]。例如,Grossman-Clarke等^[13]利用耦合了城市冠层模型的WRF模式(WRF/UCM)模拟凤凰城地区夏季极端高温事件中LUCC对近地表气温的影响。Georgescu等^[14]利用WRF模式研究北美地区城市化的可能演变进程及其对区域气候的影响,结果显示21世纪末大部分地区因城市化带来的增温可达1~2℃,甚至更高。崔耀平等^[15]基于WRF/UCM模式,得出京津唐地区城市扩展的增温贡献率约为32.75%。张学珍等^[16]利用WRF模式探讨20世纪末我国中东部地区耕地扩张的气温升降效应。

作为改革开放建立的首个经济特区,大规模的工业化和城市化使得深圳市的地表覆被变化极其显著,土地利用特征也发生了深刻且不可逆转的改变。在全球气候变化和城市化的共同作用下,相关气候监测数据表明50多年来深圳市正经历着以气温升高、湿度下降、能见度减小为主要特征的气候变化历程,其中气温增幅达1.6℃,超过全球近百年平均增幅(0.74℃)一倍多^①,这与其高速发展阶段十分吻合^[17]。当前,城市尺度上如此大规模建设用地扩张对气温、地表辐射和能量平衡的影响研究相对偏少。因此,选取深圳这个全球城市化进程最为剧烈的地区之一深入开展LUCC的气候效应研究,具有典型性和代表性。本研究基于WRF/UCM模式,

利用较高分辨率的地形数据和城市冠层参数,将1986年和2011年土地利用/覆被作为模式强迫参量,模拟深圳市在不同时期土地利用条件下1月和7月的气象要素场的差异,并将模拟结果与自动气象站点观测数据进行对比和验证,探讨在全球气候变化背景下快速城市化过程造成的LUCC对该地区近地表气温的影响。

1 研究方法 with 试验设计

1.1 数据来源

1.1.1 气象数据

本研究所用日平均近地表气温数据来自深圳气象数据观测网(<http://data.szmb.gov.cn/>),40个自动气象站点分布如图1所示。数据覆盖时间为2011年1月和7月,其中仅有4个站点缺少2011年7月12日的数据。深圳地区自动气象站点布设稠密,由于条件限制,部分站点无法严格按照地面气象观测规范测定距离地面1.50 m高度的气温。考虑到在对流层范围内高度对气温的影响,本研究首先将深圳地区40个不同海拔和探测高度的区域自动气象站点的气温按照干绝热递减率订正到海平面高度对应的值,然后以日平均气温数据计算得到的月平均气温数据和ASTER GDEM 30 m分辨率的数字高程模型(DEM)为基础资料,利用Kriging插值方法对各站点的气温数据进行空间插值处理,输出2011年1月和7月深圳地区近地表气温空间分布图,并与同时期WRF模式模拟的结果进行对比和验证。

1.1.2 地形数据

地形资料是数值模式重要的输入数据,其精度和准确性对模拟结果有较大影响。目前,WRF模式默认采用美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)制作的最高精度为30弧秒的地形资料。该数据基于8种数据源,精度没有统一的标准。研究发现,利用较高分辨率的地形资料可以在一定程度上提高WRF模式对复杂地形区的模拟性能^[18]。深圳市地形复杂,地势整体上东南高、西北低,多数地块属于低丘陵地,并有平缓台地相间,且城市建成区分布极不规则。为了得到更接近实际情况的高空间分辨率的下垫面信息,本研究利用ASTER GDEM 30 m分辨率的数字高程模型(DEM)

① 深圳市气象局. 气候变化对深圳的影响, 2011

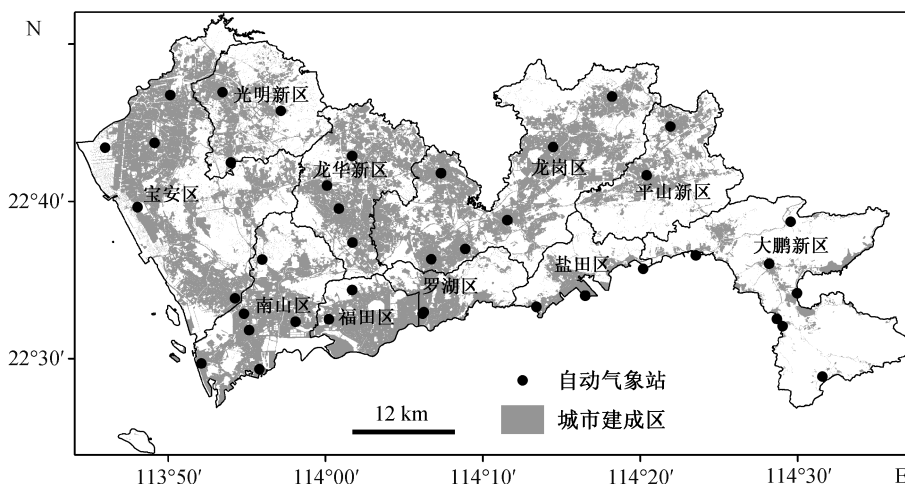


图 1 深圳市 40 个自动气象站分布

Fig. 1 Distribution of 40 ground-based atmospheric observatories

替换 WRF 模式默认的地形高度数据。

1.1.3 土地利用数据

本研究利用遥感和 GIS 技术,以 1986 年和 2011 年两个时期的 Landsat TM 30 m 分辨率遥感影像为数据源,参考深圳市土地变更调查和航片等资料,选用监督分类方法,建立解译标志,根据不同地物光谱信息构建分类模型,将遥感影像按照 USGS 的土地覆被类型进行初步划分,并通过目视解译加以修正。误差矩阵的评价结果显示分类总体精度为 87.93%,能够满足研究需求。最后,将图 2 所示的两期土地利用/覆被数据转换为 WRF 模式可以识别与读取的格式。

1.2 试验设计

本研究利用 WRFV3.7.1 版本,模式水平方向采用 Arakawa-C 坐标,垂直方向采用地形追随静力气压坐标(即欧拉质量坐标),分为 50 层,顶层气压为 100 hPa。使用 3 阶精度的 Runge-Kutta 时间积分方案,母区域时间积分步长为 54 s。模式模拟采用三重双向嵌套,中心点地理坐标为 22.61°N, 114.06°E,水平格距分别为 9 km, 3 km 和 1 km,依次覆盖我国华南地区、珠三角地区和深圳地区(图 3)。模式的初始场和侧边界条件选用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)时间间隔为 6 小时的 ERA-Interim 全球再分析资料(0.75°×0.75°)。物理过程参

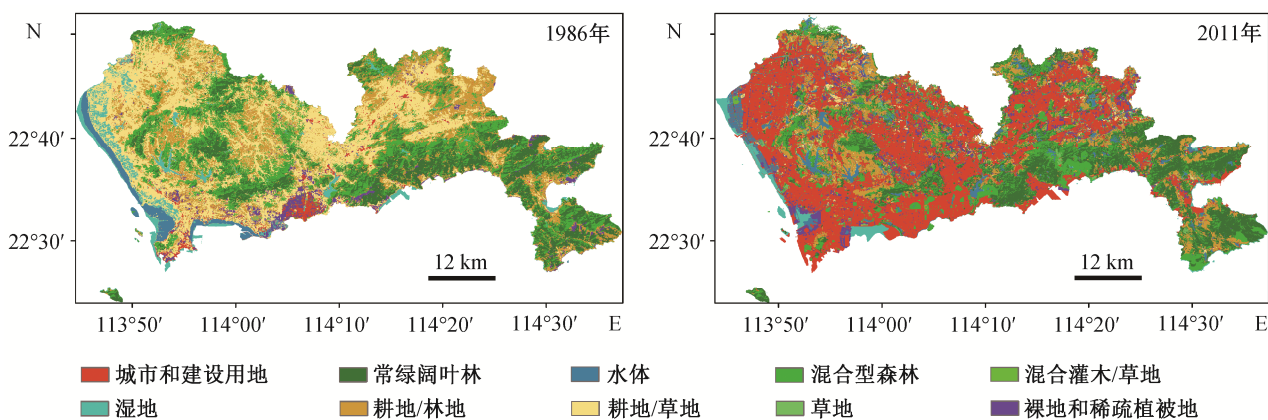


图 2 1986 年和 2011 年土地利用类型

Fig. 2 Maps of LUCC data in 1986 and 2011

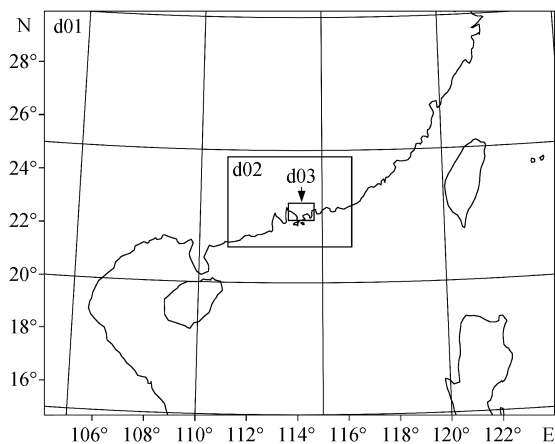


图3 WRF 模式嵌套网格设计
Fig. 3 Domain of the simulations

表1 WRF 模拟试验设计
Table 1 Summary of numerical experiments carried out

模式参数名称	参数设定
土地利用/覆被数据	控制实验(REF): 2011 年 敏感性试验(ST): 1986 年
模拟时段	2011-01-01 至 2011-01-31 2011-07-01 至 2011-07-31
输出时间步长	360/360/60 min
初始场和侧边界条件	ERA-Interim 全球再分析数据(0.75°×0.75°)
分辨率	水平: 9 km, 3 km, 1 km 垂直: 50 层

数化方案分别为 WSM6 微物理过程方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案和 Noah 陆面过程方案。由于第二、三重模拟区域分辨率较高, 仅在第一重模拟区域使用 Kain-Fritsch 积云对流方案。除土地利用/覆被数据外, 两组试验采用完全相同的参数设置(表 1)。模拟时间为 2011 年 1 月和 7 月, 其中每个月前 5 天为积分稳定时间(spun-up), 后 26 天为有效模拟结果。

为了更详细地描述城市热力学和动力学效应, WRF 模式在其 Noah 陆面过程方案中耦合了城市冠层模式(UCM)。该模式设计低密度居民区、高密度居民区和工商业/交通用地等 3 种不同的城市类型, 对应的建设用地比例依次为 0.5, 0.9 和 0.95。研究表明, 利用改进的 UCM 模式(WRF-UCM2D)可以有效地提升温度模拟的精度^[19-20]。因此, 本研究在 WRF/UCM 模式的基础上, 利用上述土地利用数据制成城镇建设用地比例空间分布图(FRC_URB2D), 并替换现有 UCM 模式中的固定值(FRC_URB)。

2 结果分析

2.1 模拟结果检验

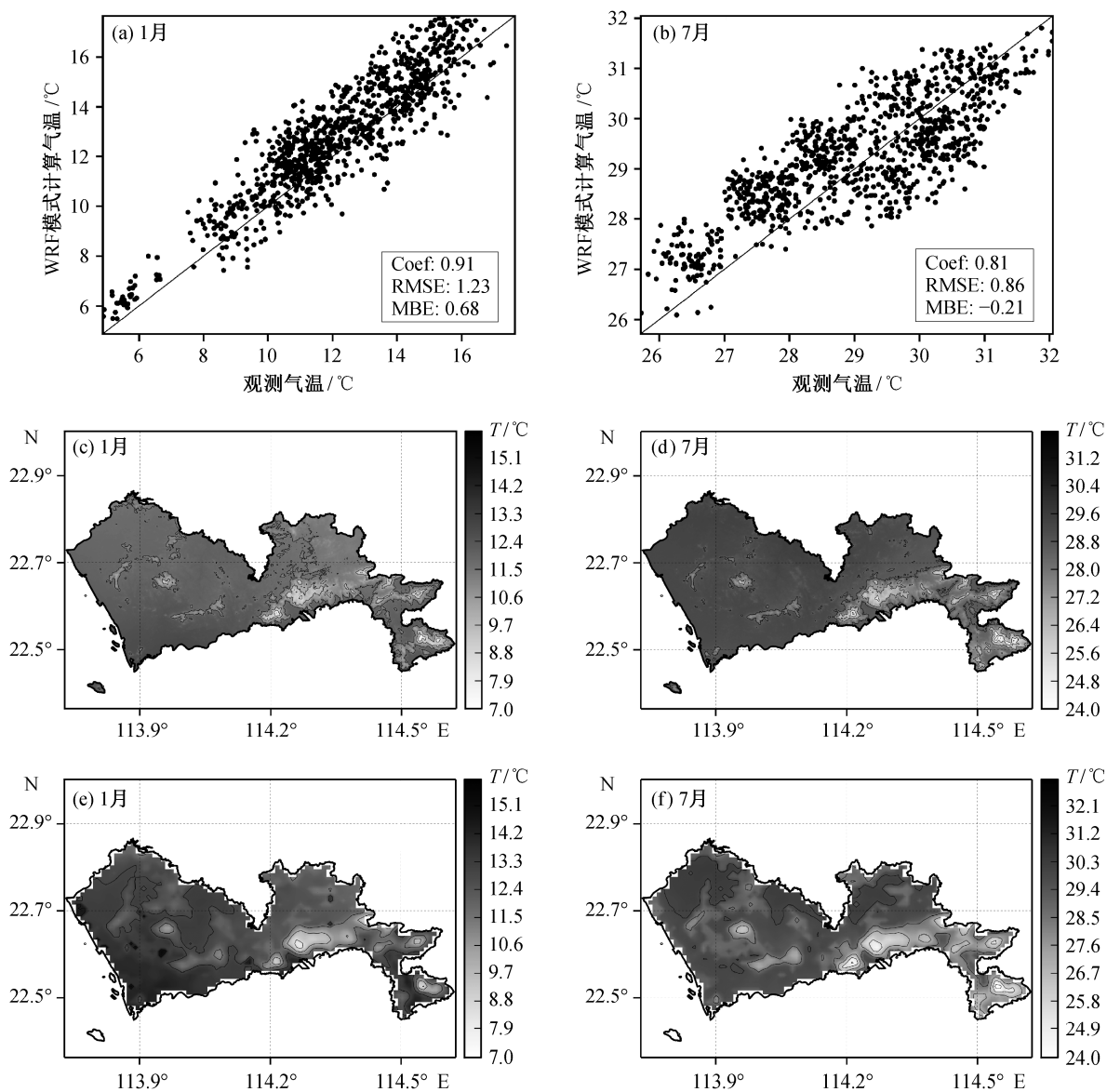
本研究利用深圳市 40 个自动气象站点 2011 年 1 月和 7 月的观测数据, 对 REF 试验中 WRF 模式的模拟性能进行评估, 计算模拟值与观测值的均方根误差(root-mean-square error, RMSE)、平均偏差(mean bias error, MBE)和相关系数(correlation coefficient, Coef), 计算方法参见文献[21]。统计结果显示, 各个自动气象站点与 WRF 模式模拟的日平均近地表气温的相关系数分别为 0.91 和 0.81 ($p < 0.01$)(图 4), 而 7 月的均方根误差(0.86)和平均偏差(-0.21)均小于 1 月。与以往研究相比, 本研究的统计指标值均处于可接受的误差范围内^[21]。

通过对比分析 2011 年 1 月和 7 月 Kriging 插值的观测温度场和 WRF 模式模拟温度场的异同性, 发现二者均能够较好地反映深圳市月平均气温空间分布的基本特征(图 4), 即因受地形与下垫面性质等因素影响, 月平均气温总体上呈现西高东低的变化趋势。高值区主要位于西北和中部的低丘陵地及平缓台地, 局部山顶温度略微偏低。低值区主要分布在东南部海拔和植被覆盖度较高的山区。西南部为滨海冲击平原, 地势相对平坦, 气温变化过渡也较为平缓。此外, 受海陆热力调节作用的影响, 深圳地区近地表气温分布呈现夏季内陆气温高、冬季沿海气温高的特点。同时, 模拟结果与观测数据之间也存在一定的差异, 主要表现为模拟温度比观测值略高。其中, WRF 模式模拟的深圳市 2011 年 1 月和 7 月的平均气温分别为 12.46℃ 和 29.04℃, 观测数据插值结果为 11.78℃ 和 28.70℃。

总体而言, 利用 WRF 模式模拟得到的近地表气温分布能够较好地代表整个深圳地区的实际情况, 为下面的研究奠定了基础。

2.2 土地利用/覆被变化引起的气温变化

1986—2011 年, 深圳市土地利用结构和空间变化十分剧烈, 主要表现为农业用地资源锐减, 非农业用地, 特别是城镇建设用地的面积与比例不断增加, 分别从 1986 年的 39.63 km² 和 2.11%, 增加到 2011 年的 774.05 km² 和 40.25%。本研究中 WRF 模式在深圳地区 1 km×1 km 的格点总数为 2000 个, 53.65% 格点的土地利用/覆被发生了改变。其中, 耕地/草地、耕地/林地、混合型森林转变为建设用地的格点数依次为 474, 150 和 88, 混合型森林开垦



(a)和(b) 日平均气温散点图; (c)和(d) Kriging 插值的月平均气温; (e)和(f) WRF 模式模拟的月平均气温

图 4 2011 年 1 月和 7 月观测与 WRF 模式模拟的气温

Fig. 4 Observed and simulated temperatures in January and July in 2011

为耕地/林地的格点数为 101, 这 4 类 LUCC 占变化格点总数的 75.77%。

本文通过 REF 和 ST 试验模拟深圳市 LUCC 引起的近地表气温变化。如图 5 所示, 大多数格点的温度变化均通过 95%置信水平的 Student-t 统计检验。研究表明, 随着大范围的土地利用/覆被改变, 深圳市气温整体上呈现升高趋势, 但不同季节和地区增温幅度有所差异。每种 LUCC 在所有发生变化的格点处气温变化的平均值和标准差如表 2 所示, 其中夏季(7 月)增温幅度普遍大于冬季

(1 月), 这与利用气象观测资料分析得到的结果^[17]一致。龙岗、宝安、南山、福田等地区城镇建设用地扩张的升温效应最明显, 1 月和 7 月从其他土地利用类型转变为建设用地引起的增温幅度约为 0.70~0.82℃和 1.22~1.57℃。混合型森林开垦为耕地/林地的增温幅度为 0.24℃(1 月)和 0.52℃(7 月), 略高于常绿阔叶林开垦为耕地/林地的增温幅度 0.13℃(1 月)和 0.42℃(7 月)。混合型森林和常绿阔叶林之间的动态转换导致的增温幅度较小, 大致为 0.07~0.12℃(1 月)和 0.28~0.36℃(7 月)。值

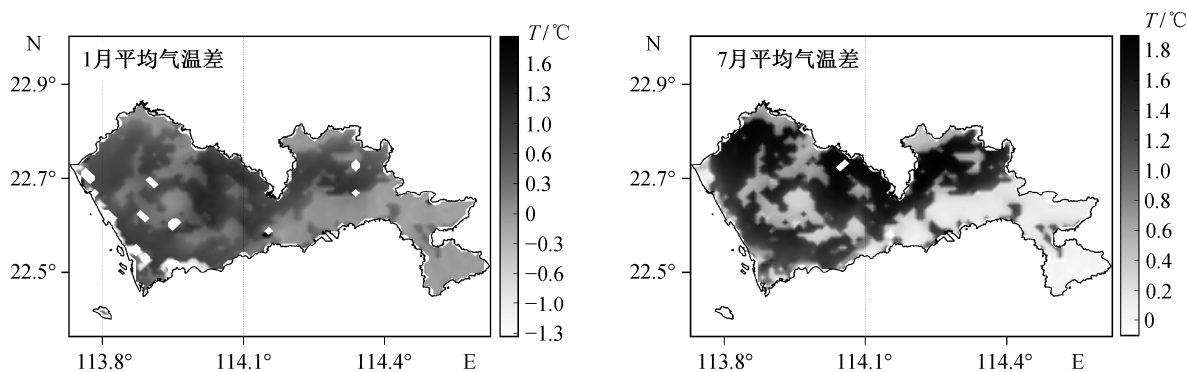


图5 1986和2011年土地利用/覆被引起的气温变化
Fig. 5 LUCC-induced monthly average temperature changes in 1986 and 2011

表2 主要土地利用/覆被及其气温变化
Table 2 LUCC-induced monthly average temperature changes

土地利用/覆被变化	1月		7月	
	平均温度/°C	标准差/°C	平均温度/°C	标准差/°C
耕地/草地→建设用地	0.82	0.20	1.57	0.18
耕地/林地→建设用地	0.76	0.24	1.47	0.16
混合型森林→建设用地	0.75	0.20	1.38	0.21
湿地→建设用地	0.70	0.14	1.22	0.17
混合型森林→耕地/林地	0.24	0.19	0.52	0.17
常绿阔叶林→耕地/林地	0.13	0.17	0.42	0.13
混合型森林→常绿阔叶林	0.12	0.20	0.36	0.22
常绿阔叶林→混合型森林	0.07	0.08	0.28	0.18

值得注意的是，虽然增温效应在 LUCC 区域较为显著，但由于受局部大气扩散和传输等因素影响，大部分土地利用/覆被未发生改变的地区也出现不同程度的增温。

LUCC 和温室气体排放是人类活动对气候影响的两个重要方面，由于两者都趋向于增温，因此很难将 LUCC 对局地或区域气候的影响从全球变暖的大背景中区分出来。本研究通过 REF 和 ST 试验，模拟出 LUCC 对于近地表气温月均值的影响为 0.42°C (1月)和 0.91°C (7月)。同时，再分析资料主要反映由于温室气体增加和大气环流等引起的大尺度气候变化，对土地利用/覆被不敏感^[1,22]。因此，本研究基于 ERA-Interim 全球再分析资料(0.125° × 0.125°)，采用 5 年移动平滑方法，计算得到深圳地区 1986—2011 年 1 月和 7 月平均温度变化趋势(图 6)。25 年间深圳地区整体月平均气温差大致为 0.26°C (1月)和 0.30°C (7月)，将其近似地作为大尺度

背景温度变化。因此，粗略地得出 LUCC 对区域气温变化的贡献率约为 61.76%(1月)和 75.21%(7月)。

2.3 地表辐射和能量平衡的变化

地表能量平衡主要是指地表接收的净短波辐射、地表有效长波辐射、潜热通量和感热通量之间的平衡过程，还包括局地热存储量，地表面与生物、物理和化学过程有关的其他能量，如人为热通量。LUCC 通过改变地表反照率、粗糙度等陆面物理属性，对地表辐射和能量平衡产生影响，从而引起近地表气温的变化。

本研究计算了 REF 和 ST 试验中深圳地区 1986 年和 2011 年主要 LUCC 引起的地表辐射和能量的差异。如图 7 所示，转变为城镇建设用地会导致地表净辐射通量明显增加 17~32 W/m²，这主要是由于城市下垫面多为建筑物和不透水的路面，蒸发和蒸腾量较小，并且能够吸收更多的太阳辐射，加上人为的热排放，使得地表能量更多地以感热形式

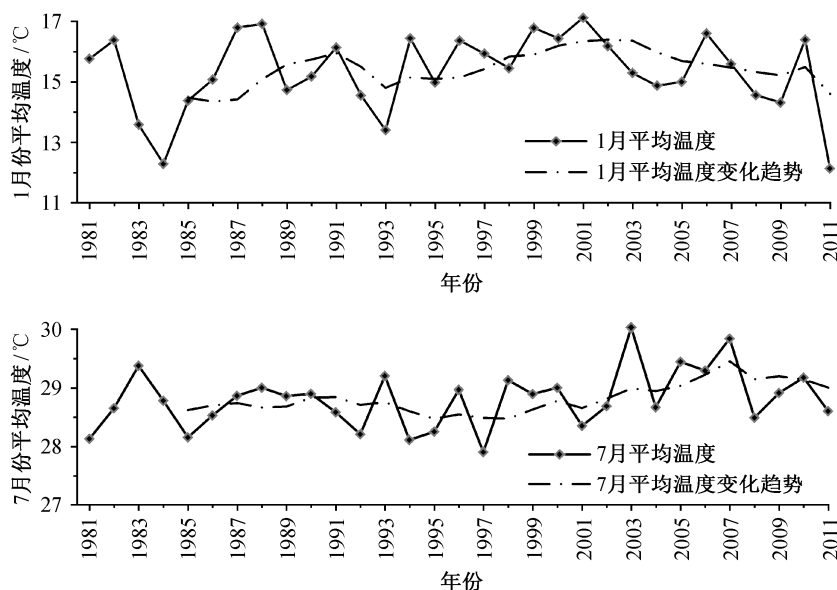


图 6 深圳市 1986—2011 年 1 月和 7 月平均温度变化趋势
Fig. 6 Background temperature changes in January and July over 1986–2011

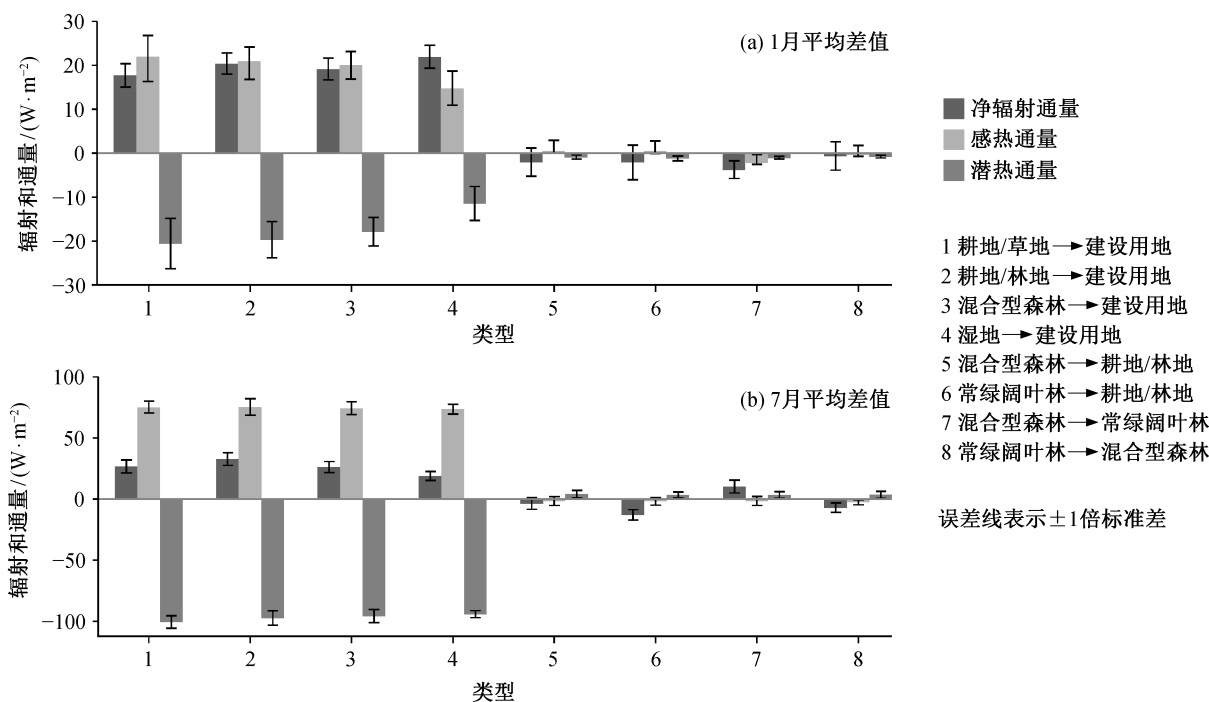


图 7 1986 年和 2011 年主要土地利用/覆被及其地表辐射和能量变化
Fig. 7 Major LUCC and its changes of surface radiations and energy budgets in 1986 and 2011

向大气输送, 潜热通量随之减小, 减幅为 $-11\sim-100\text{ W/m}^2$, 从而导致局地近地表气温升高。植被覆盖状况好的地区则呈现与城市地区相反的特点。该区域土壤湿度较大, 蒸发和蒸腾量随之提升, 使得地表能量更多地以潜热形式向大气输送, 部分抵消了

近地表气温的升高。因此, 转变为城镇建设用地的增温效应比其他用地类型更为显著。将混合型森林和常绿阔叶林开垦为耕地/林地, 将导致地表反照率升高、叶面积指数和冠层高度降低, 使得地表净辐射通量减小, 引起气温下降, 但由于地表粗糙度和

根系深度减小,造成地表与大气间潜热交换变弱,感热通量增强,有利于气温的提升。

3 结论和讨论

3.1 结论

本研究基于 Landsat 遥感影像解译的 1986 年和 2011 年深圳市土地利用/覆被数据,采用中尺度气候模式 WRF/UCM,分别进行两组数值模拟试验,探讨在全球气候变化背景下,快速城市化过程造成的 LUCC 对深圳地区近地表气温的影响。主要结论如下。

1) 利用深圳市自动气象站点观测数据对 WRF 模式模拟性能进行评估,发现该模式对深圳市近地表气温模拟效果较好,能够较为准确地反映月平均气温西高东低的空间分布特征。

2) 1986—2011 年,深圳市在快速城市化进程中发生大规模的土地利用/覆被变化,引起近地表气温整体上呈现增高趋势,但不同季节和地区温度变化幅度有所差异。其中,7 月增温幅度(0.91°C)普遍大于 1 月(0.42°C),各种自然植被覆盖型用地转变成城镇建设用地的升温效应最为明显,约为 $0.70\sim 1.57^{\circ}\text{C}$ 。

3) 土地利用/覆被变化引起的气温变化与地表热收支参量密切相关。城镇建设用地扩张使得地表净辐射通量明显增加 $17\sim 32\text{ W/m}^2$,能量更多地以感热形式向大气输送,潜热通量随之减小,减幅为 $-11\sim -100\text{ W/m}^2$,从而导致局地近地表气温升高。

3.2 讨论

人类活动引起的土地利用/覆被变化已成为全球和区域气候变化的重要驱动因素,它对气候的影响不仅具有局地性和季节性差异,而且与气候背景联系密切^[23]。已有研究表明,在区域乃至更小的尺度上,土地利用/覆被变化通过辐射收支、能量平衡和水文循环等生物地球物理过程对气候的影响通常比温室气体排放更为显著^[24-25]。本研究中土地利用/覆被变化对于深圳市近地表气温提升幅度分别为 0.42°C (1月)和 0.91°C (7月),最高可达 1.84°C ,与近几十年来该地区观测升温幅度(1.6°C)相近。因此,本研究结果表明在全球变暖的背景下,土地利用/覆被的剧烈变化是造成该地区气温变化幅度远高于全球平均水平(0.74°C)的主要原因。

长期以来,很多学者通过设置不同的控制和敏感性试验改变研究区下垫面状况,探讨土地利用/覆

被变化对天气、气候和大气环流的影响^[26-27]。虽然虚拟试验夸大了外强迫因子的作用,使其在理解实际问题方面存在一定的局限性,但是,在理解真实过程的影响机制之前,虚拟试验有助于分析气候对各种外强迫因子的敏感程度,这是开展进一步研究和理解气候关键物理过程的基础^[22]。

本研究结果表明区域近地表气温的变化对土地利用/覆被变化较为敏感,但在土地利用/覆被变化对区域增温的相对贡献方面,本文仅利用较粗分辨率的再分析资料粗略地进行了分析。当前,关于全球变暖背景下土地利用/覆被变化的气候效应还存在很大的不确定性^[28],因此有必要开展更深入和全面的研究,如采取多种方法和高分辨率的资料进行长时间的连续的数值模拟,通过更接近现实情况的模拟结果,综合分析土地利用/覆被变化、温室气体和气溶胶等多种因素对温度、降水和大气环流等气候要素变化的相对贡献,为气候变化的归因和分析提供科学依据,为今后采取相应措施减缓和适应气候变化提供参考。

参考文献

- [1] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531
- [2] Pongratz J, Reick C H, Raddatz T, et al. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(8): L08702
- [3] 孟春雷. 城市地表特征数值模拟研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 464-474
- [4] Hirsch A L, Pitman A J, Kala J, et al. Modulation of land-use change impacts on temperature extremes via land-atmosphere coupling over Australia. *Earth Interactions*, 2015, 19(12): 1-24
- [5] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319: 756-760
- [6] Lee S H, Kim S W, Angevine W M, et al. Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas air quality study 2006 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(5): 2127-2143
- [7] Qu R, Cui X, Yan H, et al. Impacts of land cover change on the near-surface temperature in the North China plain. *Advances in Meteorology*, 2013: Article

- ID 409302, doi: 10.1155/2013/409302
- [8] Chen F, Yang X, Zhu W. WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: the case study of Hangzhou city, China. *Atmospheric Research*, 2014, 138: 364–377
- [9] 任玉玉, 任国玉, 张爱英. 城市化对地表气温变化趋势影响研究综述. *地理科学进展*, 2011, 29(11): 1301–1310
- [10] Ren G, Zhou Y, Chu Z, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333–1348
- [11] Chen X L, Zhao H M, Li P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 133–146
- [12] 何建军, 余晔, 刘娜, 等. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响. *大气科学*, 2014, 38(3): 484–498
- [13] Grossman-Clarke S, Zehnder J A, Loridan T, et al. Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent summer extreme heat events in the Phoenix metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(8): 1649–1664
- [14] Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, et al. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(8): 2909–2914
- [15] 崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 等. 京津唐城市群土地利用变化的区域增温效应模拟. *生态学报*, 2015, 35(4): 993–1003
- [16] 张学珍, 刘纪远, 熊喆, 等. 20 世纪末中国中东部耕地扩张对表面气温影响的模拟. *地理学报*, 2015, 70(9): 1423–1433
- [17] 张恩洁, 赵昕奕, 张晶晶. 近 50 年深圳气候变化研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(4): 535–541
- [18] 张小培, 银燕. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估. *大气科学学报*, 2013, 36(1): 68–76
- [19] Ching J, Brown M, McPherson T, et al. National urban database and access portal tool, NUDAPT. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1157–1168
- [20] Lin C Y, Su C J, Kusaka H, et al. Impact of an improved WRF-urban canopy model on diurnal air temperature simulation over northern Taiwan. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2015, 15(20): 1809–1822
- [21] Kim Y, Sartelet K, Raut J C, et al. Evaluation of the weather research and forecast/urban model over Greater Paris. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 149(1): 105–132
- [22] 华文剑, 陈海山, 李兴. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述. *地球科学进展*, 2014, 29(9): 1025–1036
- [23] Pitman A J, Avila F B, Abramowitz G, et al. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate. *Nature Climate Change*, 2011, 1(9): 472–475
- [24] Pielke R A, Marland G, Betts R A, et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 360: 1705–1719
- [25] Stone Jr B. Land use as climate change mitigation. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24): 9052–9056
- [26] Lee S J, Berbery E H. Land cover change effects on the climate of the La Plata Basin. *Journal of Hydro-meteorology*, 2012, 13(1): 84–102
- [27] 周莉, 江志红, 李肇新, 等. 中国东部不同区域城市群下垫面变化气候效应的模拟研究. *大气科学*, 2015, 39(3): 596–610
- [28] Matthews H D, Weaver A J, Eby M, et al. Radiative forcing of climate by historical land cover change. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(2): 27-1–27-4