



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

## 北半球陆地地表风速长期变化的时空特征、影响因子及其对风能资源的影响

作者姓名: 田群

指导教师: 黄刚 研究员 中国科学院大气物理研究所

胡开明 副研究员 中国科学院大气物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 气象学

培养单位: 中国科学院大气物理研究所

2020 年 6 月



**Spatiotemporal characteristics and influencing factors of  
long-term changes of land surface wind speeds over the Northern  
Hemisphere and their implications for wind energy resources**

A dissertation submitted to the  
University of Chinese Academy of Sciences  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
Doctor of Natural Science  
in Meteorology  
By  
**Tian Qun**

**Supervisor: Professor Huang Gang and Associate Professor Hu  
Kaiming**

**Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences**

**June, 2020**



## 中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

## 中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



## 摘 要

本文是中国科学院大学学位论文模板 `ucasthesis` 的使用说明文档。主要内容为介绍 `LATEX` 文档类 `ucasthesis` 的用法，以及如何使用 `LATEX` 快速高效地撰写学位论文。

**关键词：**中国科学院大学，学位论文，`LATEX` 模板



## **Abstract**

This paper is a help documentation for the L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X class ucasthesis, which is a thesis template for the University of Chinese Academy of Sciences. The main content is about how to use the ucasthesis, as well as how to write thesis efficiently by using L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

**Keywords:** University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Thesis, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X Template



## 目 录

<b>第 1 章 大气运动阻力变化对陆地地表风速长期变化的影响</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 引言 . . . . .	1
1.2 资料和方法 . . . . .	2
1.3 城市化的影响 . . . . .	4
1.3.1 基于城市动态变化和风速观测数据的统计学分析 . . . . .	4
1.3.2 数值试验 . . . . .	7
1.4 植被变化的影响 . . . . .	12
1.4.1 基于 NDVI 和风速观测数据的统计学分析 . . . . .	12
1.4.2 数值试验 . . . . .	14
1.5 大气稳定度变化的影响 . . . . .	18
1.6 本章小结 . . . . .	18
<b>附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求</b> . . . . .	<b>21</b>
A.1 论文无附录者无需附录部分 . . . . .	21
A.2 测试公式编号 $\Lambda, \lambda, \theta, \bar{\Lambda}, \sqrt{S_{NN}}$ . . . . .	21
A.3 测试生僻字 . . . . .	22
<b>参考文献</b> . . . . .	<b>23</b>
<b>作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>致谢</b> . . . . .	<b>27</b>



## 图形列表

1.1 城市扩张速度 (变化率每十年) .....	5
1.2 归一化地表风速趋势 (变化率每十年) .....	5
1.3 城市扩张速度与对应地区风速变化 .....	6
1.4 不同城市化速度地区风速演变。红色实线为快速城市化的城市附近站点风速演变，蓝色实线为所有靠近城市站点风速演变，黑色实线为所有站点风速演变。虚线为对应实线的线性趋势。 .....	6
1.5 珠江三角洲地理位置 .....	7
1.6 珠江三角洲城市扩张。a) 1980 年城市范围, b) 2015 年城市范围, c) 2015 年相对 1980 年城市范围的变化, 白色表示没有变化, 红色表示增加, 蓝色表示减少。 .....	8
1.7 模拟区域 .....	9
1.8 珠江三角洲测站位置 .....	9
1.9 城市化对地表风速的影响 ( $m s^{-1}$ )。a) 使用 2015 年 6 月气象场模拟结果, b) 使用 2015 年 12 月气象场模拟结果, 矢量箭头为对应时间背景风矢量。 .....	11
1.10 珠江三角洲模拟与观测风速变化 (变化率)。a) 模拟结果, b) 观测结果。 .....	11
1.11 珠江三角洲 20 世纪 70 年代末与 2015 年城市化状况下风速概率密度分布。红色 (蓝色) 实线为使用 20 世纪 70 年代末城市化状况 (2015 年城市化状况) 的模拟结果。 .....	12
1.12 北半球植被生长季 NDVI 趋势 (每十年) .....	13
1.13 芬兰植被分布与变化。a) 芬兰 2001 年林地分布, b) 芬兰 2016 相对 2001 植被变化, 绿色为林地变化, 红色为除林地外其他植被变化。 ..	13
1.14 芬兰站点风速趋势与附近 NDVI 趋势 .....	14
1.15 芬兰站点分布 .....	15
1.16 模拟区域 .....	15
1.17 南芬兰林地变化。绿色为增加, 黄色为减少。 .....	17
1.18 林地变化对地表风速的影响。a) 使用 2001 年 1 月气象场模拟结果 ( $m s^{-1}$ ), b) 使用 2001 年 7 月气象场模拟结果 ( $m s^{-1}$ ), c) a 和 b 模拟结果平均归一化的结果。 .....	17
1.19 近地层温度垂直递减率趋势 (每十年) .....	18



## 表格列表

1.1 珠江三角洲站点信息及模式性能评估结果 .....	10
1.2 南芬兰站点信息及模式性能评估结果 .....	16



## 符号列表

### 字符

<b>Symbol</b>	<b>Description</b>	<b>Unit</b>
$R$	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_v$	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_p$	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$E$	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
$e$	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
$h_T$	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
$h$	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
$k$	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
$S_{ij}$	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
$\tau_{ij}$	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
$\delta_{ij}$	Kronecker tensor	1
$I_{ij}$	identity tensor	1

### 算子

<b>Symbol</b>	<b>Description</b>
$\Delta$	difference
$\nabla$	gradient operator
$\delta^\pm$	upwind-biased interpolation scheme

### 缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lowy
EOS	Equation of State

JWL Jones-Wilkins-Lee

WENO Weighted Essentially Non-oscillatory

ZND Zel'dovich-von Neumann-Doering

# 第1章 大气运动阻力变化对陆地地表风速长期变化的影响

## 1.1 引言

第??章从大气运动驱动力变化的角度分析了陆地地表风速长期变化的原因，本章将从大气运动阻力变化的角度进行分析。

土地利用的变化是大气运动阻力变化的主要原因之一。如第??章所述，已有许多相关研究分析了土地利用变化对于陆地地表风速的影响 (Vautard 等, 2010; Wu 等, 2016; Kalnay 和 Cai, 2003; Guo 等, 2011)。以往的研究主要采用对比城市与乡村站点风速变化，建立参考序列与观测序列对比，或是建立简化动力模型和数值模拟的方法。其中，许多以往研究将观测站点分为城市站点和乡村站点（通常是基于人口），通过比较两类站点的风速趋势差别来确定城市化对于风速的影响 (Guo 等, 2011)。这种方法能够成立基于以下假设：城市站点周边建设用地增加总是显著快于乡村站点周边，而同时乡村站点周边建设用地增加几乎可以忽略，即人口多的地区的城市化速度显著快于人口少的地区。然而这个假设存在一定问题，更好的方式是通过计算城市人口或建设用地的动态变化来确定城市化的速度。此外，也有研究通过建立不受土地利用变化影响的参考序列，并对观测序列来考察土地利用变化的影响。有些再分析资料（如 NCEP/NCAR）没有同化陆地观测资料，因而被认为可以作为参考序列 (Kalnay 和 Cai, 2003)。Zha 等 (2017) 将此思路用于了土地利用变化对中国东部地区风速的影响。这种方法能一定程度上反映土地变化的作用，但即便同样是没有同化地表风速观测的再分析资料之间，对于地表风速变化也存在很大分歧（参见第??章），因而这种方法的可靠性也在疑问。另外一种方式是利用简化动力学模型（形式类似于第??章公式 ??），将土地利用的影响简化为拖拽系数的变化（例如Wu 等 (2016)），这种简化不一定能够代表土地利用变化对于边界层内湍流混合过程的复杂影响，因而对分析结果造成一定的不确定性。也有研究尝试用数值模拟的手段进行研究，但这些研究多是采用假设的土地利用变化情景而不是真实的土地利用变化进行研究（例如Vautard 等 (2010)）。由此，为了克服前人研究的不足，本章先是利用动态的土地利用数据与风速观测数据进行统计分析，然后设计数值试验考察真实的土地利用变化对于风速的影响。

大气运动的动量由边界层以上的自由大气向边界层内传递主要依赖湍流混合过程。垂直温度递减率是影响湍流强度的主要变量之一，原因是垂直温度递减率的改变会引起大气稳定度变化，当下层增温超过上层时气块会在浮力的作用下形成不稳定运动 (Holton, 2004)。Gaffen 等 (2000) 发现，1979-2000 年间地表附近的增暖快于对流层低层，表明边界层稳定度增加。据我所知，目前还没有研究分析近几十年来大尺度的边界层垂直温度递减率变化，本章将对这个问题进行分析。

## 1.2 资料和方法

本章使用了以下数据集：NCEI-CMDC 陆地地表风速观测数据集。此数据集的相关信息已在第二章中做过描述，这里不再重复。本章使用此数据进行大尺度长期风速变化的分析。

中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)。此数据集同样在第二章中已有介绍。本章将此数据集经过均一化处理后（处理方法将在下文详细介绍）用于珠江三角洲风速长期变化的分析。之所以在此区域的分析中没有使用 NCEI-CMDC 数据集是由于此数据集由于严格的质量控制过程剔除了大量站点，使得珠江三角洲的风速观测序列只有一个，以此分析珠江三角洲风速长期变化不确定性很大。而相比之下，经过均一化之后的中国地面气候资料日值数据集在珠江三角洲有 6 个站点，分析结果的不确定性大大降低。

[中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据集](#) 由中国科学院资源环境科学数据中心制作，包含 20 世纪 70 年代末期、80 年代末期、90 年代中期、90 年代末期、2005 年、2010 年和 2015 年 7 个时期中国土地利用/土地覆盖数据，空间分辨率为  $1 \times 1 \text{ km}$ 。此数据集使用 Landsat 遥感影像数据制作而成，包含耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地 6 个大类和 25 各小类。本章使用了 20 世纪 70 年代末和 2015 年土地利用数据作为数值模拟的边界条件进行珠江三角洲城市化对于风速长期变化影响的数值试验。

MODIS12Q1 土地利用数据集 ([Sullamenashe 等, 2019](#)) 由美国宇航局 (NASA) 制作，包含全球 2001 年至今每年  $500 \times 500 \text{ m}$  分辨率土地利用数据。此数据集使用 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 传感器数据制作而成，包含 IGBP、UMD、LAI、BGC 和 PFT5 个分类标准下的土地利用数据。

本章使用了 2001 年和 2016 年土地利用数据作为数值模拟的边界条件进行芬兰南部植被变化对于风速长期变化影响的数值试验。

[Atlas of Urban Expansion 城市变化数据集](#)由纽约大学 (NYU) 制作，包含 20 世纪 80 年代至 21 世纪前 10 年全球 200 个城市发展的动态数据，包括人口、城市建设面积、街区和道路等。此数据集使用 Landsat 遥感影像数据制作而成。本章使用了全球 200 个城市的城市建设面积动态数据分析城市化与风速长期变化的关系。

[GIMMS NDVI 3g](#)由 NASA 制作，包含全球 1981 年至 2015 年  $0.083 \times 0.083$  度归一化植被指数 (NDVI) 数据。此数据集由卫星上搭载的超高分辨率辐射计 (AVHRR) 数据制作而成，NDVI 计算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1.1)$$

其中 NIR 表示近红外光反射率，VIS 表示可见光反射率。健康的植被会吸收大部分可见光，而反射大部分近红外光，然而不健康或者稀疏的植被会反射更多可见光和更少近红外光。NDVI 的范围是 -1 ~ 1，当没有绿叶存在时 NDVI 接近与 0，当绿叶密度非常高时 NDVI 接近 1。本章使用 1982 和 2015 年 NDVI 数据分析植被变化与风速长期变化的关系。

[HadGHCND 全球地表温度观测数据集 \(Caesar 等, 2006\)](#)由哈德莱中心制作，包含全球 1950 年至今  $2.5$  纬度  $\times 3.75$  经度分辨率日最高和最低温度观测数据。此数据集由 NCEI 等全球历史气候网络 (GHCN) 日观测数据集制作而成，制作过程中包含了质量控制步骤以减少错误和可疑数据等影响，并使用角度-距离加权算法将站点数据差值到格点。本章使用 1979-2012 年地表日最高气温分析边界层日间垂直温度递减率变化。

[HadAT 全球对流层温度数据集 \(Thorne 等, 2005\)](#)由哈德莱中心制作，包含全球 1985-2012 年  $5$  纬度  $\times 10$  经度分辨率对流层 850、700、500、300、200、150、100、50 和 30 hPa 共 9 个层次的月平均温度。此数据集由 676 个探空站点数据制作而成，由于这些探空站点多分布于北半球，因而此数据集有效数据也多集中于北半球。制作过程中使用了质量控制步骤来减小仪器和观测方式等变化的影响。本章使用了 1979-2012 年 850 hPa 温度数据分析边界层垂直温度递减率的变化。

本章使用了 RHtest V4 观测序列均一化算法 (Wang 和 Feng, 2014) 对风速观测序列进行均一化处理。此算法基于 penalized maximal t test(Wang 等, 2007) 和 penalized maximal F test(Wang, 2008)，可以在有参考序列和没有参考序列的情况下检测观测序列的异常突变点，并进行修正，修正方式包括均值修正和 Quantile-Matching (QM) 修正，后者既可以调整均值也可以使突变点前后的经验分布一致 (Wang 等, 2010)，获得广泛应用 (Vincent 等, 2012; Baule 和 Shulski, 2014; Yang 等, 2019)。本章在处理珠江三角洲风速数据时使用 ERA-Interim 10 m 风场资料作为参考序列检测观测序列的突变点，并使用 QM 修正，最后用人工检查确认突变点检测和修正无明显不当之处。

本章数值试验使用了 WRF-ARW 4.0(Skamarock 等, 2019)，此模式是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的下一代中尺度数值天气预测系统，是目前模拟效果最好、应用最广泛的中尺度天气数值模式。本章的数值试验使用 FNL 作为初始和边界条件，分别针对城市化和植被变化在珠江三角洲和芬兰南部进行了两组数值试验，模式参数设置和数值试验设计将在下文中详细描述。

本章计算趋势和相关系数以及统计显著性水平的方法与第??、??章相同。  
RMSD 计算方法如下：

$$RMSD = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (c_n - \bar{c})(d_n - \bar{d})}{\sigma_c \sigma_d} \quad (1.2)$$

其中  $\bar{c}$  和  $\bar{d}$  分别为空间场 c 和 d 的均值， $\sigma_c$  和  $\sigma_d$  为 c 和 d 的标准差。

### 1.3 城市化的影响

#### 1.3.1 基于城市动态变化和风速观测数据的统计学分析

使用 Atlas of Urban Expansion 数据计算城市建设面积自 20 世纪 80 年代至 21 世纪前 10 年的变化率，发现所有 200 个城市建设面积都有增加，其中 62% 增加速度超过 50% 每十年，36% 超过 100% 每十年，增加最快的中国江苏盱城和孟加拉国 Rajshahi 增加速度超过 4000% 每十年。相比之下，北美洲和欧洲城市建设面积增加速度较慢，原因是欧美发达国家的城市化在更早时候就已经基本完成，而亚洲的中国、印度和东南亚各国，近 30 多年来城市化进程非常迅速（图 1.1）。对比使用 NCEI-CMDC 风速数据计算的 1979-2016 年归一化风速趋势，发

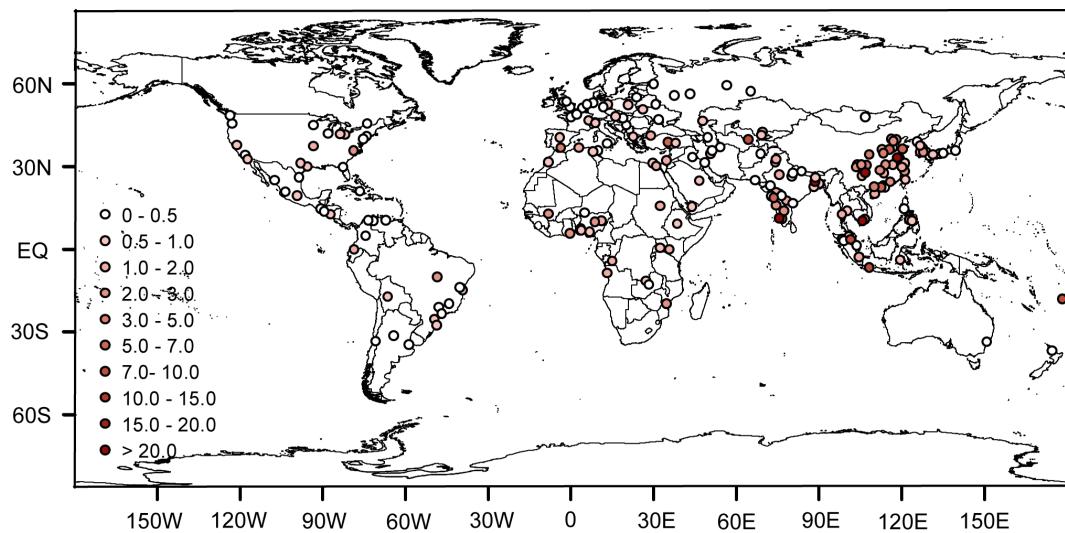


图 1.1 城市扩张速度 (变化率每十年)

Figure 1.1 City expansion rate (in changing rate per decade)

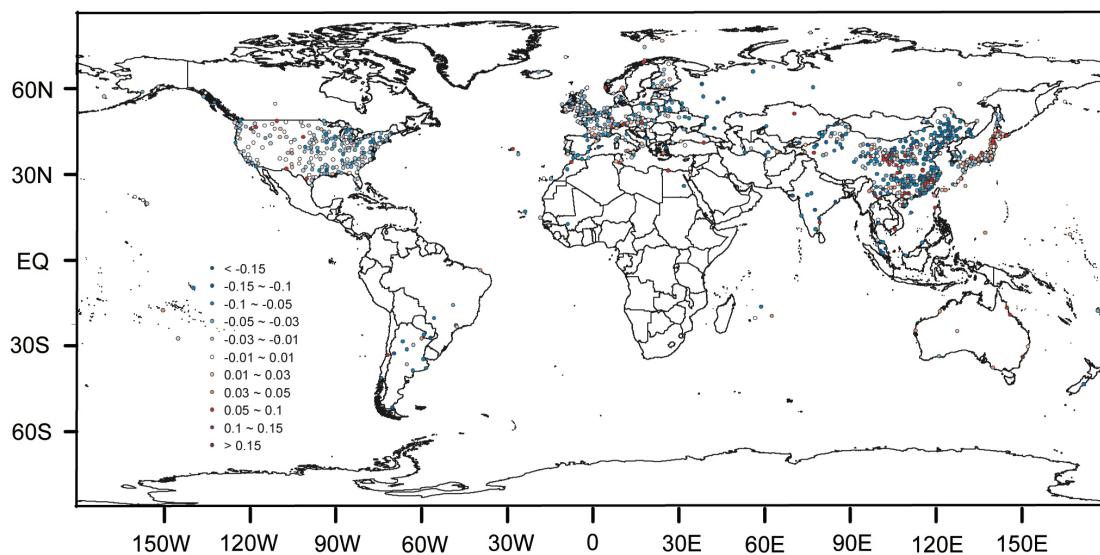


图 1.2 归一化地表风速趋势 (变化率每十年)

Figure 1.2 Normalized surface wind speed trends (in changing rate per decade)

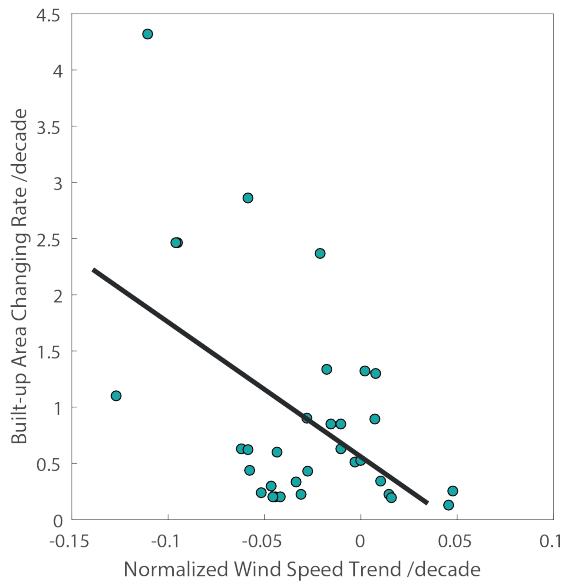


图 1.3 城市扩张速度与对应地区风速变化

Figure 1.3 City expansion versus wind speed change in the corresponding area.

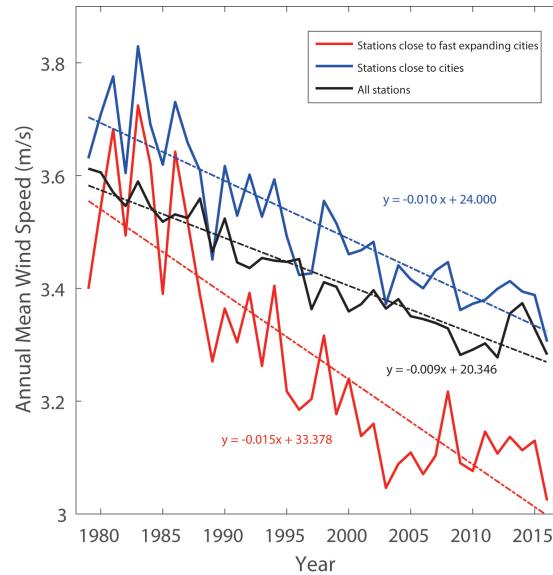


图 1.4 不同城市化速度地区风速演变。红色实线为快速城市化的城市附近站点风速演变，蓝色实线为所有靠近城市站点风速演变，黑色实线为所有站点风速演变。虚线为对应实线的线性趋势。

Figure 1.4 Wind speed evolution under different urbanization rates. Red solid line is evolution of wind speed near fast urbanizing cities, blue solid line is evolution of wind speed near all cities, black solid line is evolution of wind speed across the world. Dash lines are trends for solid lines.

现亚洲整体风速下降速度大于欧洲和北美（图 1.2），似乎预示着城市化在其中起到了一定作用。选择距离城市中心 0.15 度（约 15 km）以内的观测站点，将地表风速趋势与城市建设面积变化速度对比，发现二者有显著的负相关 ( $p < 0.01$ )，即城市扩张越快的地区，风速越趋向于减小（图 1.3）。对比上述城市中心附近站点中城市扩张速度在前 50% 的风速趋势，所有城市中心附近站点风速趋势和所有站点风速趋势发现，所有城市中心附近站点和所有站点平均风速趋势接近，分别为  $0.1$  和  $0.09 \text{ m s}^{-1}$  每十年，相比之下快速扩张城市周边站点平均风速趋势则得多，达到  $0.15 \text{ m s}^{-1}$  每十年（图 1.4）。由此说明城市化进程会使得附近的风速显著减小。

### 1.3.2 数值试验

为了进一步验证城市化与风速变化的关系，使用 WRF-ARW 4.0 进行数值试验，选择中国东南沿海的珠江入海口附近的珠江三角洲作为模拟区域（图 1.5），因为它包含广州、深圳、珠海、香港、澳门等城市，是中国近 30 多年来城市化最快的地区之一（图 1.6），而中国是全球近 30 多年来城市化最快的国家之一。此地区地势较为平坦，海拔高度基本在 800 m 以下（图 1.5）。

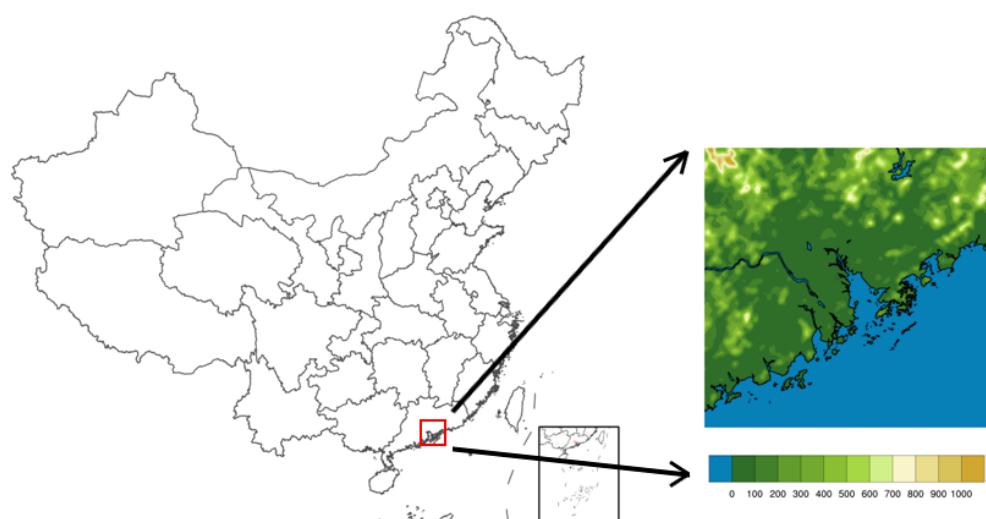
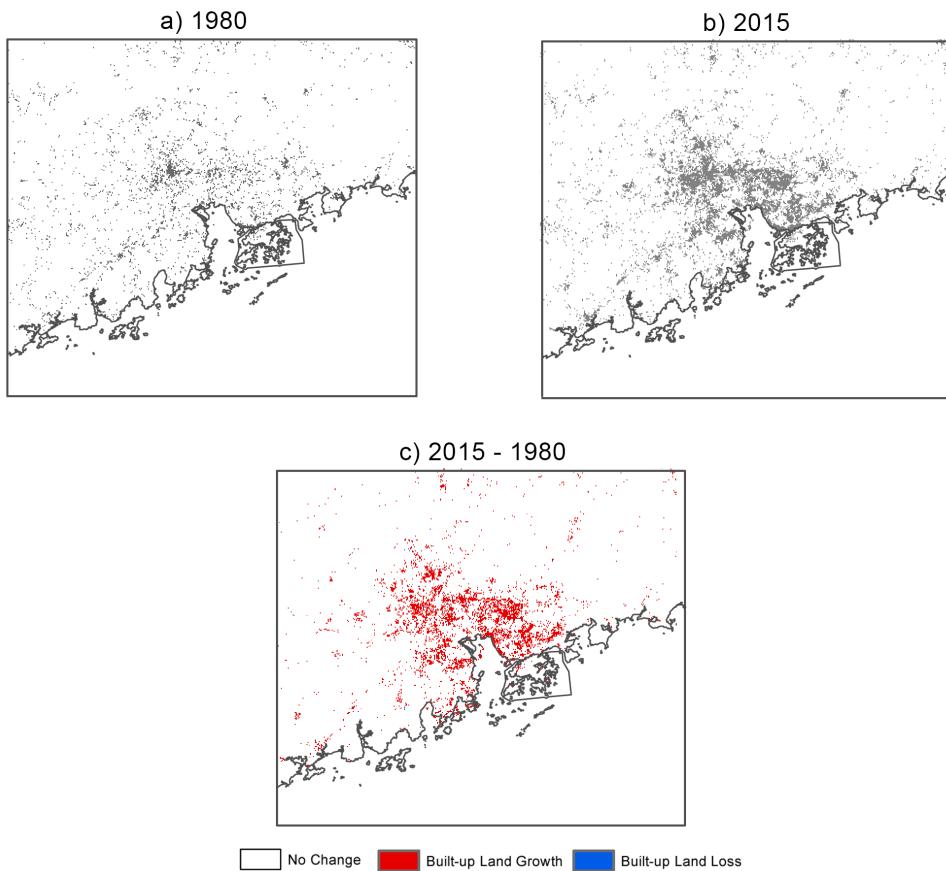


图 1.5 珠江三角洲地理位置

Figure 1.5 Location of the Pearl River Delta.

将模式设置为三层双向嵌套，空间分辨率分别为 30km、10km 和 3.3km（图 1.7），垂直包含 40 个层次，其中边界层内（1km 高度以下）10 个层次；时间



**图 1.6 珠江三角洲城市扩张。a) 1980 年城市范围, b) 2015 年城市范围, c) 2015 年相对 1980 年城市范围的变化, 白色表示没有变化, 红色表示增加, 蓝色表示减少。**

**Figure 1.6 City expansion in the Pearl River Delta. a)Built-up extension in 1980, b)Built-up extension in 2015, c)Built-up change from 1980 to 2015, white color denotes no change occurred, red denotes add, blue denotes lose.**

步长为 100 s；微物理参数化方案为 WRF Single-Moment 6-class scheme；积云参数化方案为 Grell 3D，在较高分辨率的两层网格关闭积云参数化；云量使用 Xu-Randall method；长波辐射参数化方案为 RRTM scheme，短波辐射参数化方案为 Dudhia scheme；边界层采用 BouLac PBL，地面层采用 Eta similarity，陆面模式选择 Noah-MP；城市参数化方案采用 Building Environment Parameterization (BEP)。

采用以上模式设置进行三组模拟，分别为：

1. 以华南地区 20 世纪 70 年代末土地利用类型（来自中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据集）作为下边界条件进行模拟。
2. 以华南地区 20 世纪 70 年代末土地利用类型叠加 2015 年珠江三角洲地区

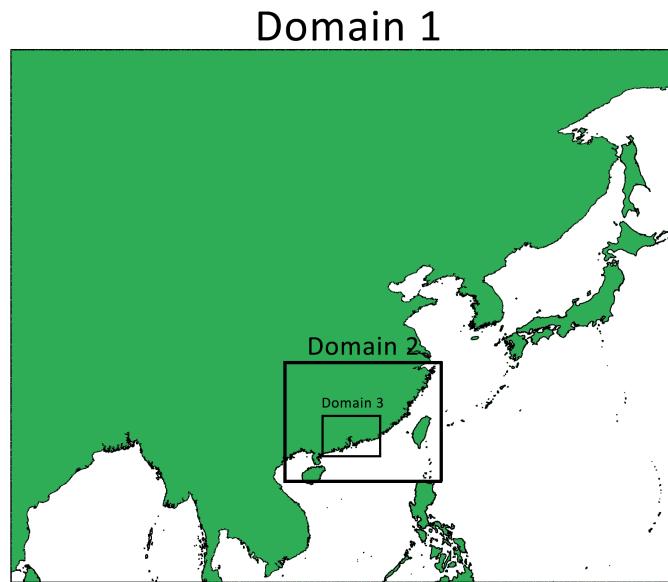


图 1.7 模拟区域

Figure 1.7 Model simulation domains

建设用地范围作为下边界条件进行模拟。

3. 以华南地区 2015 年土地利用类型作为下边界条件进行模拟。

对以上三组模拟，气象场采用 FNL2015 年 6 月和 2015 年 12 月（分别代表珠江三角洲雨季和旱季） $1 \times 1$  度 6 小时分辨率物理量场，经确认，在模拟时段内无台风和寒潮过程发生。

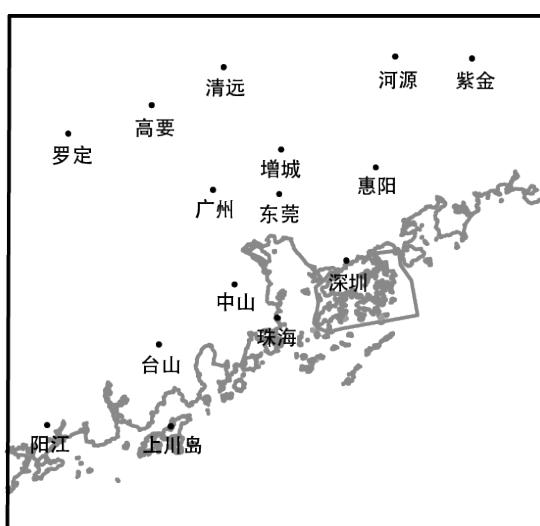


图 1.8 珠江三角洲测站位置

Figure 1.8 Observation stations in the Pearl River Delta.

使用模拟3结果对比观测进行模式性能评估，珠江三角洲及周边区域地面观测站点位置和信息可在图 1.8 和表 1.1 找到。对比模拟与观测结果，发现模拟风速普遍大于观测，这在以往的研究中也被发现 (Zhang 等, 2010; Yu 等, 2015; Zha 等, 2019)。为了减少这种模拟偏差的影响，在模拟结果的分析时，应使用归一化风速变化而不是风速变化的绝对值。模拟与观测风速体现出了很好的相关，说明模拟结果可以很大程度上抓住风速的时间变化。RMSD 结果对比以往研究 (Zhang 等, 2010; Zha 等, 2019) 也表明模式对珠江三角洲区域风速有较好的模拟效果 (表 1.1)。

表 1.1 珠江三角洲站点信息及模式性能评估结果

**Table 1.1 Description of observation stations in the Pearl River Delta and model validation results**

站名	站号	纬度	经度	海拔 (m)	10 m 风速		
					均值 ( $m s^{-1}$ ) *	相关系数 **	RMSD
高要	59278	23.02	112.27	41.9	3.7(-1.8)	0.07	1.21
清远	59280	23.43	113.05	79.2	3.4(0.1)	<b>0.39</b>	0.95
广州	59287	23.13	113.29	70.7	2.9(-0.4)	<b>0.40</b>	0.65
东莞	59289	22.58	113.44	56.8	2.3(0.5)	<b>0.44</b>	0.54
河源	59293	23.48	114.44	71.6	4.1(-2.1)	<b>0.59</b>	1.10
增城	59294	23.20	113.50	31.5	4.4(-2.0)	<b>0.34</b>	1.40
惠阳	59298	23.04	114.22	109.3	3.2(-0.6)	<b>0.55</b>	1.23
紫金	59304	23.38	115.11	177.6	3.0(-1.4)	<b>0.38</b>	0.77
罗定	59462	22.42	111.36	60.9	2.3(-0.7)	0.21	0.89
台山	59478	22.15	112.47	33.7	4.0(-1.4)	<b>0.47</b>	0.70
中山	59485	22.3	113.24	34.5	3.2(-1.0)	<b>0.35</b>	0.87
珠海	59488	22.17	113.34	52.3	6.7(-4.2)	<b>0.41</b>	1.69
深圳	59493	22.32	114.00	63.9	3.6(-1.2)	<b>0.45</b>	1.42
阳江	59663	21.5	111.58	90.8	4.2(-0.1)	0.30	0.90
上川岛	59673	21.44	112.46	22.3	5.5(0.0)	<b>0.48</b>	1.66

注：\* 括号外数值为模拟结果，括号内为观测减去模拟。

\*\* 加粗的数值代表  $p < 0.01$ 。 $r = 0.33$  对应  $p = 0.01$ ， $r = 0.25$  对应  $p = 0.05$ 。

将模拟2与模拟1的模拟结果相减，得到城市建设面积变化对于地表风速的

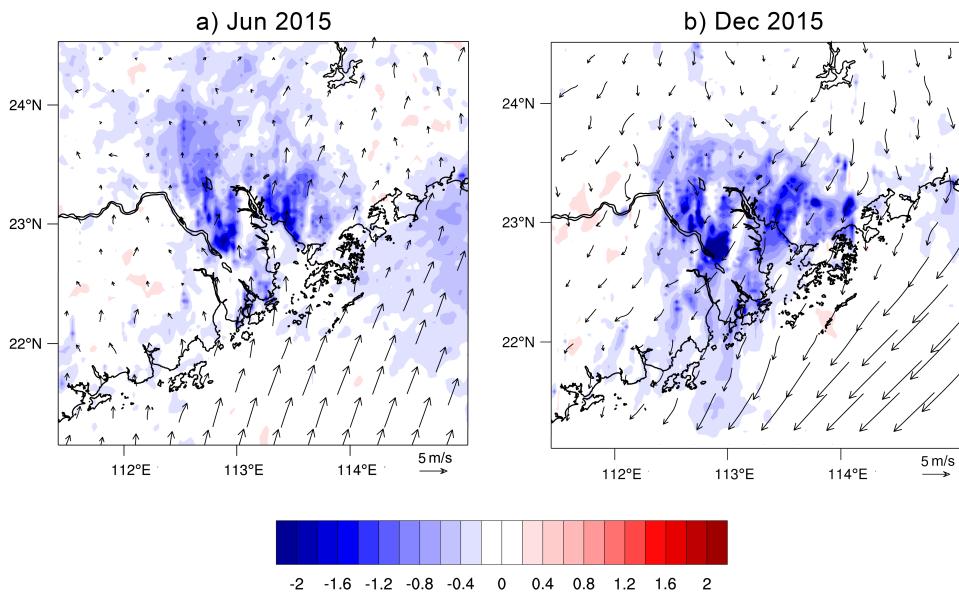


图 1.9 城市化对地表风速的影响 ( $m\ s^{-1}$ )。a) 使用 2015 年 6 月气象场模拟结果, b) 使用 2015 年 12 月气象场模拟结果, 矢量箭头为对应时间背景风矢量。

Figure 1.9 Impact of urbanization on surface wind speed (in  $m\ s^{-1}$ ). a)Model simulation using June 2015 meteorological fields, b)Model simulation using December 2015 meteorological fields, vectors are background wind vectors during corresponding periods.

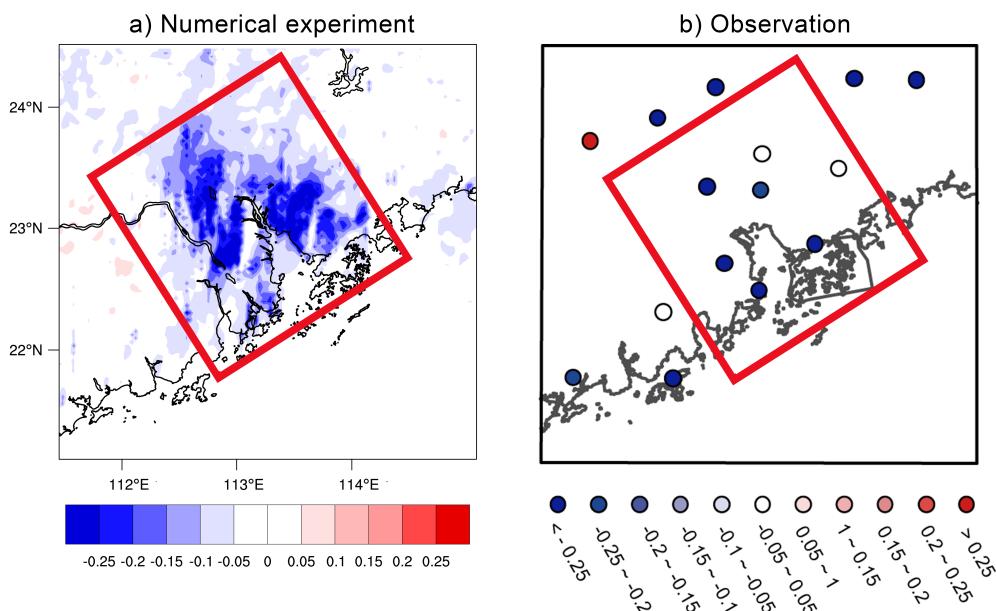


图 1.10 珠江三角洲模拟与观测风速变化 (变化率)。a) 模拟结果, b) 观测结果。

Figure 1.10 Simulated and observed wind speed change in the Pearl River Delta (in changing rate). a)Simulation, b)Observation.

影响。发现相对 20 世纪 70 年代末，珠江三角洲在 2015 年城市化状况下风速显著偏小，城市群所在区域风速差可达  $1 \text{ m s}^{-1}$  以上。同时，城市群下风向地区风速也表现出偏小，6 月珠江三角洲盛行偏南风，城市群北部有风速偏小区域；12 月珠江三角洲盛行偏北风，城市群南部有风速偏小区域（图 1.9）。将两个月模拟结果平均，并差值到 6 个观测站点（图 1.10 b) 红框内），得到风速平均减小了 11.6%，相比之下，观测风速在 1979-2016 平均减小了 33.4%，由此可得城市化对于风速减小的贡献达到 35%（图 1.10）。此外，城市化对于风速的影响主要体现在大风， $2 \text{ m s}^{-1}$  以下风速变化很小（图 1.11）。

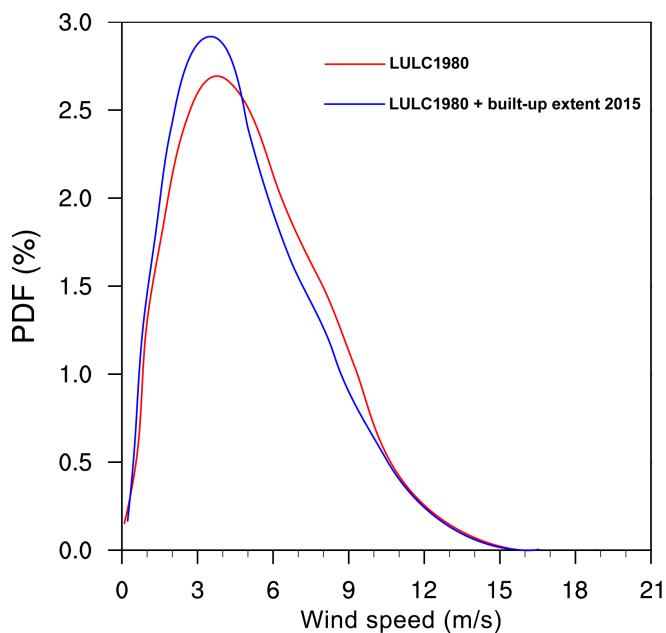


图 1.11 珠江三角洲 20 世纪 70 年代末与 2015 年城市化状况下风速概率密度分布。红色（蓝色）实线为使用 20 世纪 70 年代末城市化状况（2015 年城市化状况）的模拟结果。

**Figure 1.11 Probability distribution function of wind speed in the Pearl River Delta under the built-up condition in late 1970s and 2015. Red (Blue) line is the simulation result using built-up condition in late 1970s (2015).**

## 1.4 植被变化的影响

### 1.4.1 基于 NDVI 和风速观测数据的统计学分析

使用 GIMMS NDVI 3g 观测站点周围  $3 \times 3$  ( $\sim 25 \times 25 \text{ km}$ ) 北半球植被生长期（4-9 月）平均计算得到 1982-2015 年 NDVI 趋势，发现亚洲和欧洲的大部分区域 NDVI 有显著增加，表明植被有明显增加，相比之下，北美洲 NDVI 无明显

趋势(图1.12)。将NDVI趋势与风速趋势对比,没有发现有明显的相关关系,原因可能是草地等低矮植被的变化对10 m风速无明显影响,而林地等高大植被变化才能够对10 m风速产生影响。选取林地覆盖面积超过90%的芬兰,且其在2001-2016年间有超过95%的植被变化来自林地变化(图1.13),发现NDVI趋势与风速趋势呈显著负相关( $p < 0.05$ )(图1.14),表明植被(主要是林地)增加的区域风速趋向于减小。

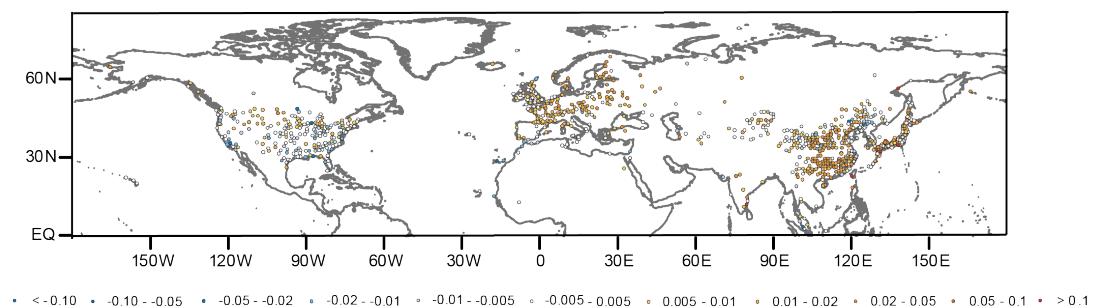


图1.12 北半球植被生长季NDVI趋势(每十年)

**Figure 1.12 Growing season NDVI trend over the Northern Hemisphere (in  $\text{decade}^{-1}$ ).**

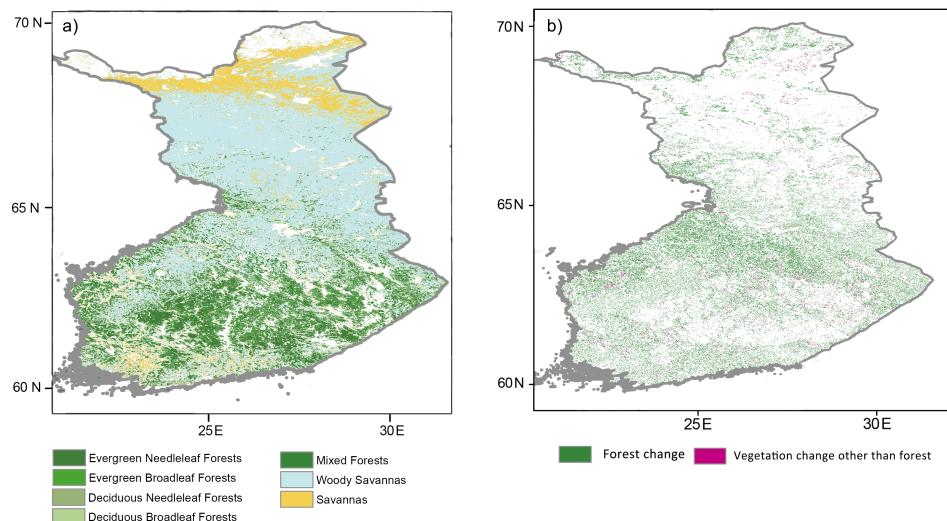


图1.13 芬兰植被分布与变化。a) 芬兰2001年林地分布, b) 芬兰2016相对2001植被变化, 绿色为林地变化, 红色为除林地外其他植被变化。

**Figure 1.13 Spatial distribution and temporal change of vegetation in Finland. a) Spatial distribution in 2000, b) Change from 2001 to 2016, green denotes woodland change, red denotes vegetation change other than woodland.**

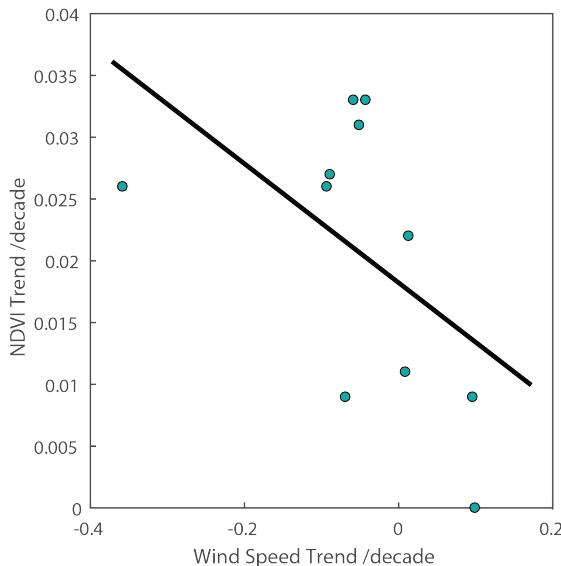


图 1.14 芬兰站点风速趋势与附近 NDVI 趋势

Figure 1.14 Wind speed trend and NDVI trend nearby in Finland.

#### 1.4.2 数值试验

使用 WRF-ARW 4.0 进行数值试验进一步验证植被与风速变化的关系，选择芬兰植被变化更为明显同时也是大部分观测站点所在的南芬兰作为模拟区域（图 1.15）。将模式设置为四层双向嵌套，空间分辨率分别为 30km、10km、3.3km 和 1.1km（图 1.16），垂直包含 40 个层次，其中边界层内（1km 高度以下）10 个层次；时间步长为 100 s；微物理参数化方案为 WRF Single-Moment 6-class scheme；积云参数化方案为 Grell 3D，在较高分辨率的两层网格关闭积云参数化；云量使用 Xu-Randall method；长波辐射参数化方案为 RRTM scheme，短波辐射参数化方案为 Dudhia scheme；边界层采用 BouLac PBL，地面层采用 Eta similarity，陆面模式选择 Noah-MP。

采用以上模式设置进行两组模拟，分别为：

1. 以南芬兰地区 2001 年土地利用类型（MODIS12Q1）作为下边界条件进行模拟。
2. 以南芬兰地区 2001 年土地利用类型叠加 2016 相对 2001 年南芬兰地区林地变化作为下边界条件进行模拟。

对以上两组模拟，气象场采用 FNL2001 年 1 月和 2001 年 6 月（分别代表植被非生长季节和生长季节） $1 \times 1$  度 6 小时分辨率物理量场。

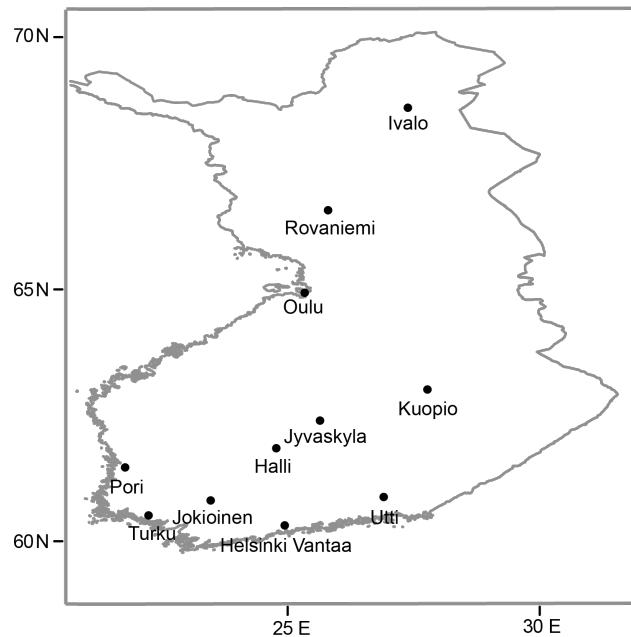


图 1.15 芬兰站点分布

Figure 1.15 Locations of observation stations in Finland.

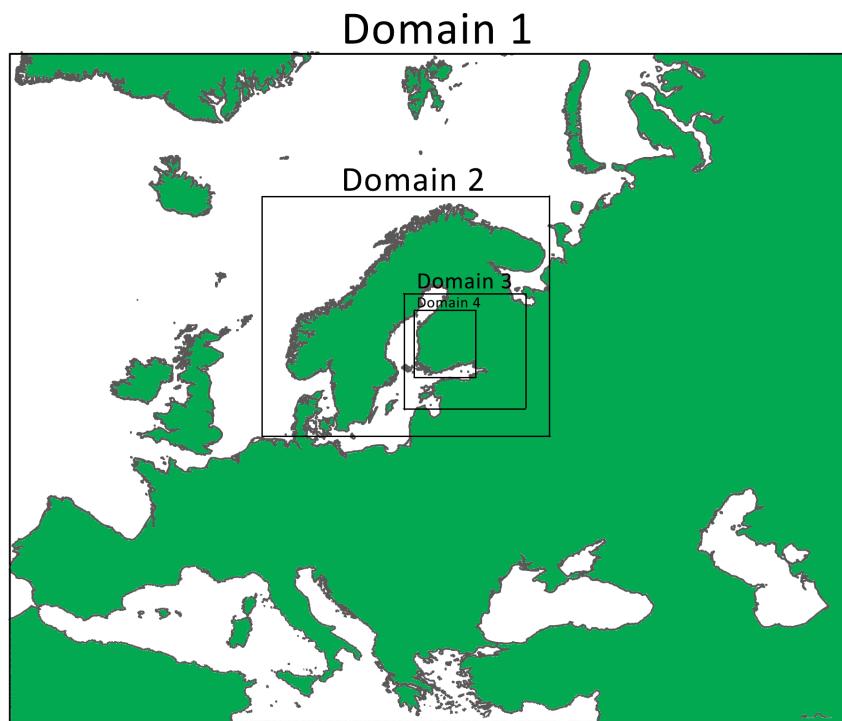


图 1.16 模拟区域

Figure 1.16 Model simulation domains

使用模拟1进行模式性能评估，南芬兰地区观测站信息参见表 1.2，表中除 Oulu、Rovaniemi、Ivalo 外，其余站点均分布在南芬兰。对比模拟与观测结果，与本章/refsec:urbanimpact 节类似，模拟风速大于观测风速，但二者相关系数较高，表明模拟能够较好的抓住风速随时间的变化，RMSD 也较低，总体来看模式模拟效果良好。

**表 1.2 南芬兰站点信息及模式性能评估结果**

**Table 1.2 Description of observation stations in the southern Finland and model validation results**

站名	站号	纬度	经度	海拔 (m)	10 m 风速		
					均值 ( $m s^{-1}$ ) *	相关系数 **	RMSD
Pori	29520	61.47	21.8	13.4	5.4(-1.4)	<b>0.38</b>	1.35
Turku	29720	60.52	22.27	49.1	5.0(-1.7)	0.26	1.57
Jokioinen	29630	60.82	23.50	103.0	4.8(-1.8)	0.04	1.41
Helsinki	29740	60.32	24.97	54.6	4.5(-0.6)	<b>0.34</b>	1.27
Vantaa							
Halli	29450	61.80	24.80	146.0	4.6(-1.5)	<b>0.36</b>	1.34
Jyvaskyla	29350	62.40	25.67	139.9	4.5(-1.1)	0.27	1.43
Utti	29660	60.88	26.93	103.3	4.0(-0.8)	<b>0.34</b>	1.33
Kuopio	29170	63.02	27.80	98.5	5.2(-1.9)	<b>0.42</b>	0.99

注：\* 括号外数值为模拟结果，括号内为观测减去模拟。

\*\* 加粗的数值代表  $p < 0.01$ 。 $r = 0.33$  对应  $p = 0.01$ ， $r = 0.25$  对应  $p = 0.05$ 。

将模拟2与1相减，得到林地变化对于风速的影响。由林地变化造成的对风速影响中，主要的作用是风速减小（图 1.18），考虑到林地变化中的超过 70% 是增加（芬兰林地变化），得到这种模拟结果非常合理。1 月林地变化对于风速变化的影响明显小于 7 月，因而 1 月很多落叶林地变得光秃，对风速的影响变小。将两个月的模拟结果平均，计算归一化风速变化，差值到观测站点，得到南芬兰 8 个站点林地对风速影响平均为-2.5%。假设林地变化与风速变化满足线性关系（即  $\Delta(\text{woodland area}) = \alpha \Delta(\text{wind speed})$ ），并以 NDVI 代替林地变化，得到 1979-2016 林地变化对风速的影响在 8 个站点平均为-5.1%，而观测风速的变化为-5.8%，即林地变化可以解释南芬兰风速变化的 87%。

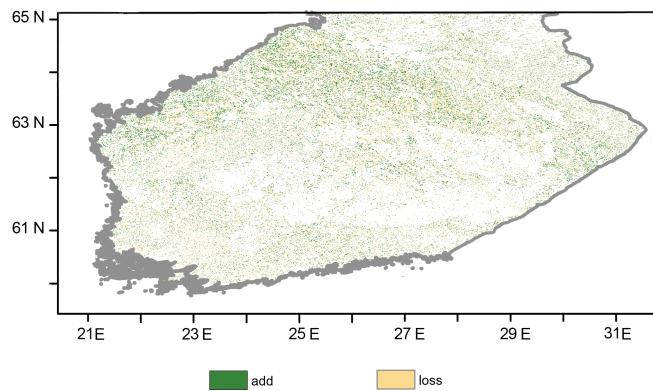


图 1.17 南芬兰林地变化。绿色为增加，黄色为减少。

**Figure 1.17 Woodland change in southern Finland. Green color denotes add, yellow denotes lose.**

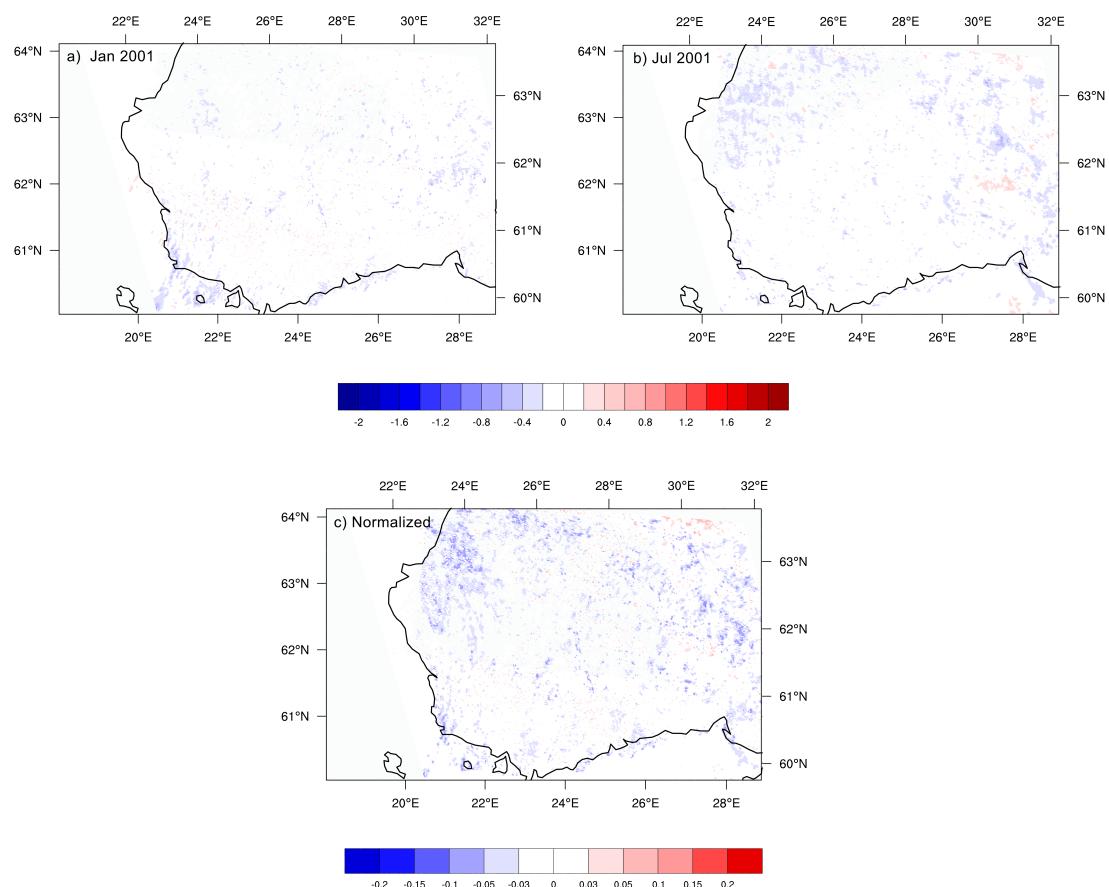


图 1.18 林地变化对地表风速的影响。a) 使用 2001 年 1 月气象场模拟结果 ( $m s^{-1}$ )，b) 使用 2001 年 7 月气象场模拟结果 ( $m s^{-1}$ )，c) a 和 b 模拟结果平均归一化的结果。

**Figure 1.18 Impact of woodland change on surface wind speed. a)Simulation with January 2001 meteorological fields (in  $m s^{-1}$ ), b)Simulation with July 2001 meteorological fields (in  $m s^{-1}$ ), c)Normalized value of a) and b) averaged.**

## 1.5 大气稳定度变化的影响

使用 HadGHCND 地表日最高气温和 HadAT 850 hPa 气温的差值估计地表至 850 hPa 日间垂直温度递减率，因为缺乏对应的对人为误差进行调整过的 850 hPa 位势高度观测数据，计算时假设两层之间的高度变化可以忽略，这会对计算结果产生一定的不确定性。结果发现北美洲日间边界层垂直温度递减率有普遍减小，表明北美洲日间地表温度增加慢于 850 hPa（约为边界层顶高度），这会使得边界层内稳定性增加，湍流活动减弱，高层动量难以传递到地表附近。这也一定程度上解释了为何北美洲对流层低层风速显著增加而地表风速显著减小。欧洲有效数据较少，大部分格点日间垂直温度递减率增加，表明地表日间增温快于对流层底层。亚洲的情况与欧洲类似，这种情况下有利于边界层内湍流活动发展，高层动量更容易传递到地表附近（图 1.19）。

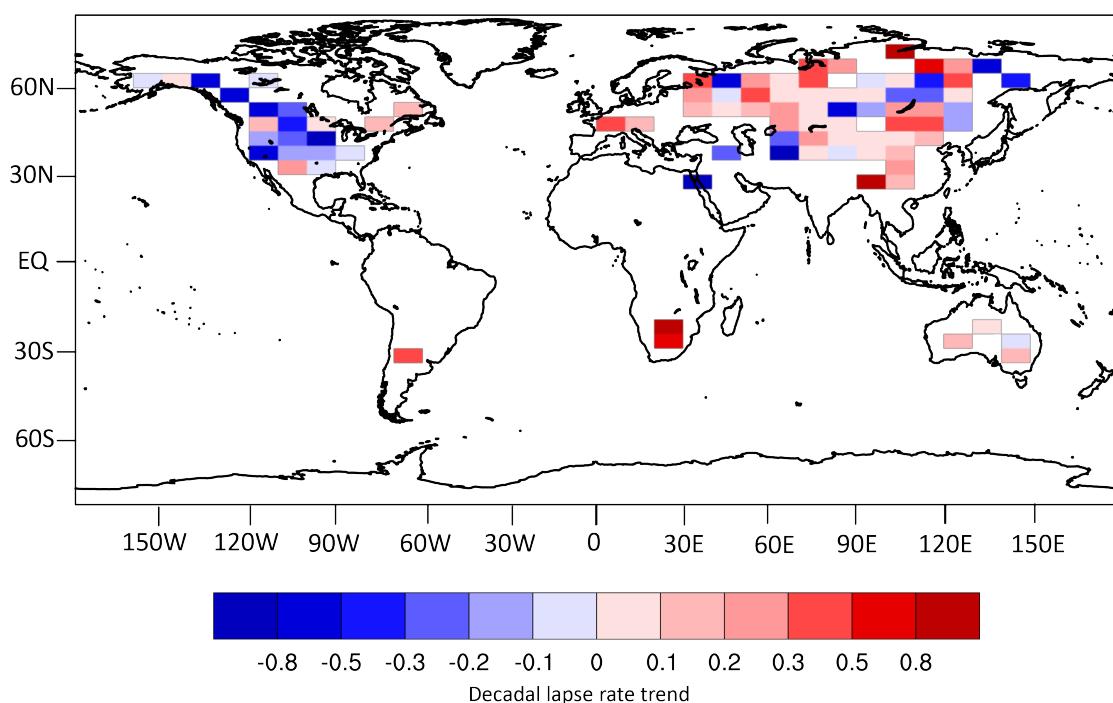


图 1.19 近地层温度垂直递减率趋势 (每十年)

Figure 1.19 Near surface lapse rate trend (in  $\text{decade}^{-1}$ )

## 1.6 本章小结

本章从城市化，植被变化和大气稳定度变化三个方面分析了大气运动阻力变化对于陆地地表风速长期变化的影响，得到以下结论：

1. 近 30 多年来全球特别是亚洲城市化进程迅猛，城市化速度与风速趋势呈显著负相关关系，表明城市化进程是地表风速减小的重要原因，模式试验结果表明珠江三角洲城市变化可以解释 1979 年来观测风速减小的 35%。

2. 近 30 多年来 NDVI 在北半球普遍呈增长趋势，表明植被普遍增加，但其与风速变化并没有很好的相关关系，原因可能是草地等低矮植被对 10 m 风速难以产生显著影响。在植被变化由林地变化主导的芬兰发现 NDVI 与风速趋势呈显著负相关，模式试验结果表明南芬兰林地变化可以解释 1979 年以来观测风速减小的 87%。

3. 北美日间垂直温度递减率普遍呈负趋势，预示着湍流活动减弱，高层动量难以向地表附近传递，这也解释了为何北美自由大气风速和地表风速趋势呈反向变化。欧洲和亚洲日间垂直温度递减率大部分呈现正趋势，预示湍流活动增强，高层动量更容易向地表附近传递。



## 附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求

学位论文是研究生科研工作成果的集中体现，是评判学位申请者学术水平、授予其学位的主要依据，是科研领域重要的文献资料。根据《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》(GB/T 7713-1987)、《学位论文编写规则》(GB/T 7713.1-2006) 和《文后参考文献著录规则》(GB7714—87) 等国家有关标准，结合中国科学院大学（以下简称“国科大”）的实际情况，特制订本规定。

### A.1 论文无附录者无需附录部分

#### A.2 测试公式编号 $\Lambda, \lambda, \theta, \bar{\Lambda}, \sqrt{S_{NN}}$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{cases} \dots \quad (A.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u \, d\Omega + \int_S \mathbf{n} \cdot (u \mathbf{V}) \, dS = \dot{\phi} \quad \dots \quad (A.2)$$

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t) e^{-st} \, dt, \quad \mathcal{L}\{f\}(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t) e^{-st} \, dt$$

$$\mathcal{F}(f(x + x_0)) = \mathcal{F}(f(x)) e^{2\pi i \xi x_0}, \quad \mathcal{F}(f(x + x_0)) = \mathcal{F}(f(x)) e^{2\pi i \xi x_0}$$

mathtext:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ , mathnormal:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ , mathrm:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ .

mathbf:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ , mathit:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ , mathsf:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ .

mathhtt:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ , mathfrak:  $\mathfrak{A}, \mathfrak{F}, \mathfrak{L}, y, v, \sigma$ , mathbb:  $\mathbb{A}, \mathbb{F}, \mathbb{L}, \mathbb{k}, \mathbb{w}, \mathbb{A}, \sigma$ .

mathcal:  $\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{L}, \in, \exists, \nabla, \sigma$ , mathscr:  $\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{L}, \dots, \sigma$ , boldsymbol:  $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$ .

vector:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$ , unitvector:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$

matrix:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$ , unitmatrix:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$

tensor:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$ , unittensor:  $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$

### A.3 测试生僻字

## 参考文献

- BAULE W J, SHULSKI M D. Climatology and trends of wind speed in the beaufort/chukchi sea coastal region from 1979 to 2009[J]. International journal of climatology, 2014, 34(8):2819-2833.
- CAESAR J, ALEXANDER L V, VOSE R S. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111.
- GAFFEN D J, SANTER B D, BOYLE J S, et al. Multidecadal changes in the vertical temperature structure of the tropical troposphere[J]. Science, 2000, 287(5456):1242-1245.
- GUO H, XU M, HU Q. Changes in near-surface wind speed in china: 1969–2005[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(3):349-358.
- HOLTON J R. An introduction to dynamic meteorology (4th ed.)[M]. Elsevier Academic Press, MA, 2004.
- KALNAY E, CAI M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. Nature, 2003, 423 (6939):528-531.
- SKAMAROCK W, KLEMP J, et al. A description of the advanced research wrf model version 4. ncar technical notes.[R]. NCAR, 2019.
- SULLAMENASHE D, GRAY J M, ABERCROMBIE S P, et al. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The modis collection 6 land cover product[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222:183-194.
- THORNE P, PARKER D E, TETT S F B, et al. Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110.
- VAUTARD R, CATTIAUX J, YIOU P, et al. Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. Nature geoscience, 2010, 3(11):756-761.
- VINCENT L A, WANG X L, MILEWSKA E J, et al. A second generation of homogenized canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D18).
- WANG X L. Penalized maximal f test for detecting undocumented mean shift without trend change [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(3):368-384.
- WANG X L, WEN Q H, WU Y. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46(6):916-931.
- WANG X L, CHEN H, WU Y, et al. New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49 (12):2416-2436.

- WANG X, FENG Y. Rhtests v4 user manual[Z]. Climate Research Division, Science and Technology Branch, Environment Canada, 2014.
- WU J, ZHA J, ZHAO D. Estimating the impact of the changes in land use and cover on the surface wind speed over the east china plain during the period 1980–2011[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(3):847-863.
- YANG S, WANG X L, WILD M. Causes of dimming and brightening in china inferred from homogenized daily clear-sky and all-sky in situ surface solar radiation records (1958–2016)[J]. Journal of Climate, 2019, 32(18):5901-5913.
- YU E, SUN J, CHEN H, et al. Evaluation of a high-resolution historical simulation over china: climatology and extremes[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(7):2013-2031.
- ZHA J, WU J, ZHAO D. Effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over china in the last 30 years[J]. Progress in Physical Geography, 2017, 41(1):0309133316663097.
- ZHA J, ZHAO D, WU J, et al. Numerical simulation of the effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over eastern china[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(3-4):1783-1803.
- ZHANG N, GAO Z, WANG X, et al. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in yangtze river delta, china[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 102(3): 331-342.

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

本科生无需此部分。

### 作者简历

#### casthesis 作者

吴凌云，福建省屏南县人，中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生。

#### ucasthesis 作者

莫晃锐，湖南省湘潭县人，中国科学院力学研究所硕士研究生。

### 已发表 (或正式接受) 的学术论文:

1. ucasthesis: A LaTeX Thesis Template for the University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

### 申请或已获得的专利:

(无专利时此项不必列出)

### 参加的研究项目及获奖情况:

可以随意添加新的条目或是结构。



## 致 谢

感激 `casthesis` 作者吴凌云学长, `gbt7714-bibtex-style` 开发者 `zepinglee`, 和 `ctex` 众多开发者们。若没有他们的辛勤付出和非凡工作,  $\text{\LaTeX}$  菜鸟的我是无法完成此国科大学位论文  $\text{\LaTeX}$  模板 `ucasthesis` 的。在  $\text{\LaTeX}$  中的一点一滴的成长源于开源社区的众多优秀资料和教程, 在此对所有  $\text{\LaTeX}$  社区的贡献者表示感谢!

`ucasthesis` 国科大学位论文  $\text{\LaTeX}$  模板的最终成型离不开以霍明虹老师和丁云云老师为代表的国科大学位办公室老师们制定的官方指导文件和众多 `ucasthesis` 用户的热心测试和耐心反馈, 在此对他们的认真付出表示感谢。特别对国科大的赵永明同学的众多有效反馈意见和建议表示感谢, 对国科大本科部的陆晴老师和本科部学位办的丁云云老师的细致审核和建议表示感谢。谢谢大家的共同努力和支持, 让 `ucasthesis` 为国科大学子使用  $\text{\LaTeX}$  撰写学位论文提供便利和高效这一目标成为可能。

