

基于城市空气调节的区域绿色基础设施识别研究

Regional Green Infrastructure Space Pattern Identification Based on Urban Air Conditioning

吴远翔 刘晓光 吴冰 袁雪娇

WU Yuan-xiang, LIU Xiao-guang, WU Bing, YUAN Xue-jiao

中图分类号: TU986

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2018)01-0033-05

DOI: 10.14085/j.fjyl.2018.01.0033.05

收稿日期: 2017-09-18

修回日期: 2017-11-28

吴远翔/1971年生/男/江苏人/博士/哈尔滨工业大学建筑学院副教授/研究方向为城市绿色基础设施、景观生态规划(哈尔滨 150001)

WU Yuan-xiang, who was born in 1971 in Heilongjiang Province, is an associate professor, Ph.D. in School of Architecture, Harbin Institute of Technology. His research focuses on urban green infrastructure and ecological planning (Harbin 150001).

刘晓光/1969年生/男/黑龙江人/博士/哈尔滨工业大学建筑学院副教授/研究方向为城市生态社区、景观生态规划(哈尔滨 150001)

LIU Xiao-guang, who was born in 1969 in Heilongjiang Province, is an associate professor, Ph.D. in School of Architecture, Harbin Institute of Technology. His research focuses on urban ecological community and ecological planning (Harbin 150001).

吴冰/1970年生/男/黑龙江人/博士/哈尔滨工业大学建筑学院高级工程师/研究方向为区域生态规划(哈尔滨 150001)

WU Bing, who was born in 1970 in Heilongjiang Province, is a senior engineer, Ph.D. in School of Architecture, Harbin Institute of Technology. His research focuses on urban regional ecological planning (Harbin 150001).

袁雪娇/1989年生/女/四川人/哈尔滨工业大学建筑学院在读硕士研究生/研究方向为城市绿色基础设施(哈尔滨 150001)

YUAN Xue-jiao, who was born in 1989 in Sichuan Province, is a master in School of Architecture, Harbin institute of technology. Her research focuses on urban green infrastructure (Harbin 150001).

摘要: 在中国城市高密度开发的用地模式下, 依靠城市内部的有限绿地很难达到空气净化的自平衡。城市周围的绿地、水体等绿色基础设施在提供清洁空气、消解空气污染物、调节城市气候中发挥着重要作用。论文从调节城市空气质量的视角切入, 以哈尔滨为研究案例, 以 ArcGIS 为数据分析平台, 提出市域尺度下城市绿色基础设施识别的方法: 1) 空间单元识别: 以局地环流理论为依据, 根据地表覆盖与植被类型数据, 识别出绿色基础设施的 3 类空间单元; 2) 城市风场分析: 通过对一年四季典型月份的气象统计和基于风环境模拟软件 CALMET 的风场模拟, 得到哈尔滨的典型月份风环境图; 3) 空间体系表达: 根据城市风环境图, 分析绿色基础设施在调节城市空气中发挥的作用, 得到 GI 的空气调节空间分布体系。研究成果可以作为编制城市绿地系统规划和制订区域生态绿地保护策略的依据, 并在城市风环境分析、城市风道规划等领域得到进一步应用。

关键词: 绿色基础设施; 城市空气调节; CALMET; GI 空间分布; 哈尔滨

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划: 寒地可持续社区基础设施规划模型(编号 GZ15A511); 住房和城乡建设部软科学研究项目: 基于生态系统服务的寒地城市生态网络规划关键技术研究(编号 2017-K4-008)

Abstract: Under the high-density development land use patterns in China, it is difficult to achieve the self-balance of air purification relying on the limited green space inside the city. Green patches, water patches and other ecological patches around the city play an important role in providing clean air, dispelling air pollutants and regulating the urban climate. From the perspective of regulating urban air quality, taking Harbin as a study case, this paper proposes a method of urban green infrastructure spatial schema recognition and translation at the city scale based on the analysis platform of ArcGIS: 1) Basic identification: Relying on the local circumfluence theory, three types of spatial units of green infrastructure are identified according to the data of land cover and vegetation types. 2) Urban wind field analysis: through the meteorological statistics of typical months of the year and the wind field simulation based on CALMET software, the typical monthly wind environment map of Harbin is obtained. 3) Spatial schema translation: the role of green infrastructure in regulating urban air is analyzed according to the urban wind environment map to obtain the air conditioning spatial schema of GI. The research results can be used as the basis for the planning of urban green space system and the formulation of regional ecological protection strategies, and further application in the urban wind environment analysis and urban air duct planning.

Keywords: green infrastructure; urban air conditioning; CALMET; GI space pattern; Harbin

Fund Items: Application Technology and Development Scheme of Heilongjiang province: The Planning Model of Sustainable Community Infrastructure in Winter City (No. GZ15A511); Minister of housing and urban-rural development of PRC, research project of soft science: key technology of ecological network planning in winter city based on ecosystem service (No. 2017-K4-008)

1 引言

进入 21 世纪以来, 快速的城市扩张和高密度、集约化的用地发展模式使得中国大多数大

城市(特别是特大型城市)都面临着较为严重的城市空气污染问题^[1]。空气问题主要表现在以下 3 个方面: 一是受热岛效应影响, 城市核

心区热污染严重^[2]；二是城市内部的高浓度空气污染物无法进行快速有效地扩散；三是近10年以来出现的日益严重的城市雾霾^[3]。为解决城市的空气污染问题，20世纪70年代，德国气候学家和城市规划专家开始合作，探讨应用城市气候学、生态学等方面的相关理论指导城市规划与绿地建设，并在斯图加特、柏林、慕尼黑等城市进行探索与实践，提出了一套较为系统的城市气候学理论与规划管理方法及策略，研究成果奠定了这一研究领域的基础理论并得到广泛应用^[4]。到20世纪90年代，随着计算机技术的进一步发展，基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称CFD)技术对城市风环境的模拟计算与分析为研究提供了更为坚实的技术支撑^[2]。借助计算机手段的辅助，建设城市风道以加快城市热空气流通和污染物排放已成为研究的热点领域，并作为改善城市气象的重要手段。近年来，日本和中国香港在城市气候学与城市设计的跨学科交叉、城市风道的系统分级等方面的研究也有了新的进展。中国大陆在建设城市风道以加速城市通风、缓解热岛效应等方面进行了一系列的积极尝试与探索，并在武汉、南京等城市规划与管理中进行了实践与应用^[5-7]。

绿色基础设施(Green Infrastructure, 简称GI)为城市提供了包括空气净化、气候调节等一系列的生态服务，是城市可持续发展的生命支撑系统^[8-9]。中国城市采用的集约化用地的模式使得城市建设区表现出开发强度高、建设密度高的特征，城市内的绿地数量少而珍贵，仅依靠城市内部的绿地远远无法达到空气自净。根据学者研究，城市中拥有70%面积的森林型绿地才能维持城市的碳氧平衡，而对空气污染物的净化则需要更大的面积^[10]；因此，城市周边的绿地、水体等生态斑块在提供清洁空气、消解空气污染物、调节城市气候中发挥着重要作用^[11-12]。当前区域绿色基础设施在生物多样性保护、城乡绿地系统规划、绿道建设等方面取得了一系列研究成果^[13]，但对于GI对城市气候的作用与影响，以及如何保护与建设调节城市气候的重要生态斑块，还缺乏深入与系统的研究。同时，城市风道建设是当前改善城市空气的重要手段，但关

于如何建立城市风道与作为新鲜空气供给源的生态斑块间的有效连接，也有待深入研究。

为了保证绿地规划建设更科学，并能够对改善城市气候条件发挥更大作用，需要对城市及区域内的气候资料进行系统而准确的掌握。德国最早在斯图加特、慕尼黑等城市编制城市气候图以指导城市建设和环境规划；到目前为止，全球已有20多个国家开展了城市气候图的研究与编制工作^[14-15]。城市气候图通常包括热污染、通风条件、大气污染、评估与分析等方面的内容。然而，绘制城市气候环境图需要多年的气象观测数据和用地类型、空气污染及其排放数据，并由专家团队进行综合整理与分析，工作量巨大；在中国除香港等极少数城市外，大多数城市还没有编制气候图^[16]。针对这种情况，本研究通过气象模拟软件CALMET进行城市风场模拟与分析，以哈尔滨为研究案例，以ArcGIS为数据分析平台，提出市域尺度下调节城市空气的绿色基础设施识别的方法，讨论GI在改善城市气候中扮演的角色与发挥的作用，以及对应的绿地保护与建设规划策略。

2 研究方法

2.1 局地环流理论下的GI空间单元分类

20世纪70年代，德国规划学家开始与气候学家合作研究，针对斯图加特严重的空气污染问题规划城市风道，并奠定了城市风环境研究的基础，其中克雷斯(Kress)提出的局地环流理论得到了广泛的应用^[17-18]。局地环流理论认为：下垫面可划分为补偿空间、空气引导通道及作用空间。作用空间指存在热污染或空气污染的建成及待建区域；补偿空间毗邻作用空间，可以通过空气交换来缓解空间中的空气污染。克雷斯将补偿空间划分为冷气流生成区及新鲜空气补给区两大类。冷气流生成区依靠空气的热压差形成局地风环流系统，可以对作用空间产生气候调节功能^[19]。在城市微风或静风气候条件下，冷空气的生成对城市污染物的扩散起到重要作用^[20]，其中地表类型及土壤性质对傍晚及夜晚冷空气的产生具有关键的影响。植物具有吸废吐氧的功效并且可以吸收空气中的污染物，因此大型绿地都是补偿空间中新鲜空气的供给区。

当前对绿色基础设施的空间分布与作用关系的描述大多依据景观生态学原理，将GI网络定义为由枢纽斑块(hubs)、连接廊道(links, corridor)和小斑块(site, stepping stone)组合而成，3类斑块形态各异，并承担不同的生态职能^[8]。与以往研究不同的是，基于城市空气调节视角的GI识别依据空气环流理论，关注绿地气体改变与气候调节的生态过程对城市的影响。以生态斑块作为GI基本单元，以空间单元之间的生态作用关系机制来揭示GI空间分布在城市空气改善中发挥的作用。

2.2 气象分析与区域风场模拟

掌握区域的气象资料和风场情况对于科学、准确地识别GI至关重要。目前中国绝大多数城市还没有编制城市气候图，需要利用气象模拟软件来模拟区域的气象情况。研究城市尺度风环境常用的软件主要是以CFD技术为主的风场模拟软件，其中Airpak、Fluent、Phoenix^[21]应用较多。CFD软件在街区尺度和城市尺度的风环境模拟与计算中精确度较高^[22]，但在区域尺度下，由于空气运动规律、软件参数设置和数据输入类型与城市尺度的气象模拟有较大差异，因此城市尺度风模拟软件并不适宜在区域尺度进行应用。

本研究采用气象模型CALPUFF中的CALMET模块对区域气象情况进行模拟。CALPUFF软件是由西格玛研究公司开发，美国国家环保局(USEPA)长期支持开发的气象模型，是中国环境保护部颁布的《环境影响评价技术导则：大气导则》(修订版)推荐的模式之一，适用于10~1000km²尺度范围的气象模拟^[23]。CALPUFF中的CALMET模块在世界范围内被广泛应用于科研部门的气象预测中，是中国天气预报采用的气象预测手段之一，具有数据获取便捷、精确度较高等特征^[24]。

本文气象数据为美国宇航局(NASA)的Global Change Master Directory(GCMD)提供的包括风速、风向、气温、云底高度、云量、气压和相对湿度等气象资料，经由中尺度气象模型CALMET利用质量守恒原理对风场进行诊断与模拟。CALMET包括诊断风场模块和微气候模块，输出结果包括研究区域风向、风速、高程及地形模拟图等。

3 哈尔滨市区域绿色基础设施的识别方法

论文选取哈尔滨作为研究案例，研究区域包括哈尔滨中心城区及其周边的呼兰、阿城、双城、巴彦 4 个区和肇东市、兰西县，总面积 19 715.3km²。木兰、五常等哈尔滨直管区县因距离主城区较远，其生态斑块对城区风环境影响较弱，没有将其划入研究区域。研究采用的数据为第二次全国土地调查的地表覆盖 (land cover) 数据，应用 ArcGIS10.2 进行数据分析与处理。

将哈尔滨城市绿色基础设施识别分为 3 个步骤。首先是空间单元识别，根据局地环流理论，分析不同生态斑块在调节城市空气中发挥的作用，按照地表覆盖数据识别出不同类型的 GI 单元；其次是城市风环境分析，收集哈尔滨城市气象资料，应用 CALMET 对城市不同季节风环境进行模拟计算，得到四季典型月的风场图；最后是空间体系识别，根据城市风场图，对生态斑块进行进一步的筛选与分类，分析其对城市风环境的影响，并按其重要性进行分级，得到 GI 的空间分布体系。

3.1 空间单元识别

根据谢高地等的研究，不同类型生态系统的气体调节和气候调节能力有很大差异 [25]

(表 1)。气体调节能力主要是对空气组成成分的调节与改变，包括吸碳放氧和净化空气有害物质，可以衡量绿地的新鲜空气供给能力；其中林地和湿地是最为重要的新鲜空气补给区，草地、水体和农田新鲜空气补给能力较弱。气候调节能力是指作为冷空气生成源而对局部气候进行改变与调节的能力。在城市周边的生态斑块中，林地、湿地和水体是最为理想的冷气流生成区，其次是草地和水田，旱田气候调节能力较弱。

研究依据生态斑块在改善城市空气质量中发挥的不同功能而将其识别为不同类型的 GI 单元。从研究区域的地表覆盖数据 (图 1) 来看，城市周边的生态斑块按植被类型的不同可分为林地、湿地、水田、旱田、河流、草地等类型。依据局地环流理论对补偿空间的分类，研究把绿色基础设施分为 3 类 GI 单元 (图 2)，即气体调节单元 (新鲜空气供给生态斑块)、气候调节单元 (冷空气生成生态斑块) 和气候

气体调节单元 (兼具 2 种功能生态斑块)。

1) 气体调节单元：按照植被生态类型的差异，将林地、湿地等气体调节能力强的绿地划分为 3 个重要 GI 单元，将旱田、草地等气体调节能力一般的绿地划分为 4 个次要 GI 单元；

2) 气候调节单元：将具备较强气候调节能力的水田划分为 4 个冷空气生成单元；

3) 气候气候调节单元：沿松花江、呼兰河，由水体、湿地、滨水绿地组成的带状绿地，具有较强的气体调节能力和气候调节能力，将这 2 个绿带划分为多功能单元。

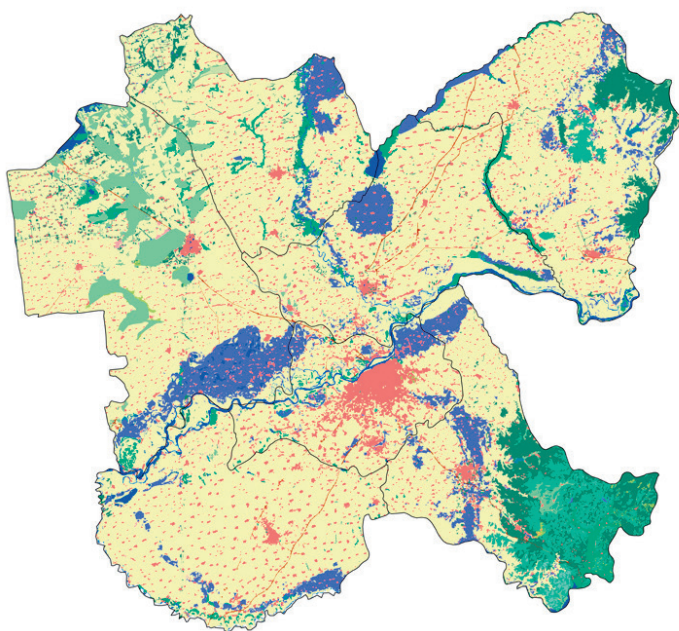
3.2 城市风场分析

黑龙江是典型的季风性气候地区，盛行风伴随季节的变化而显著改变。区域地处西伯利亚大陆板块的东南方向，冬季时分西伯利亚寒流来袭，冬季非常干燥寒冷漫长。夏季受到来自海洋的暖湿气流影响，导致冬夏季温差变化巨大。冬季盛行偏西或偏北风，夏季盛行偏南或东南风。春、秋季较短，偏南、

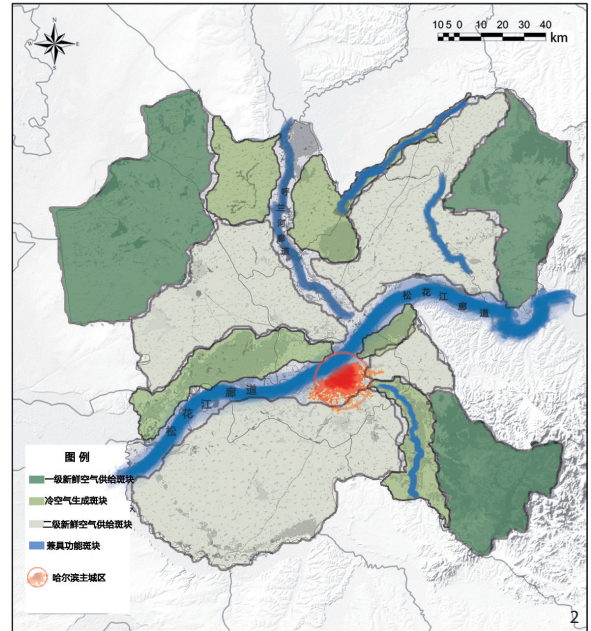
表 1 单位面积生态系统服务价值当量 (1 000 元 /hm²)

Tab. 1 The equivalents of ecosystem service value supplied by per unit area of ecosystem (1 000 CNY/ hm²)

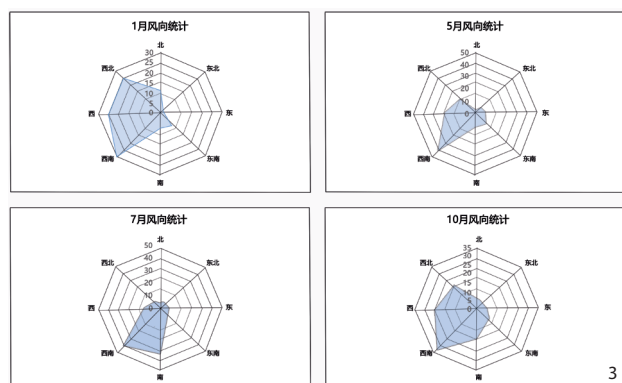
生态系统类型	森林 (针叶—针阔混交)	草地 (草原—草甸)	湿地	水系	农田 (旱地)	农田 (水田)
气体调节	1.70 ~ 2.35	0.51 ~ 1.14	1.90	0.77	0.67	1.11
气候调节	5.07 ~ 7.03	1.34 ~ 3.02	3.60	2.29	0.36	0.57



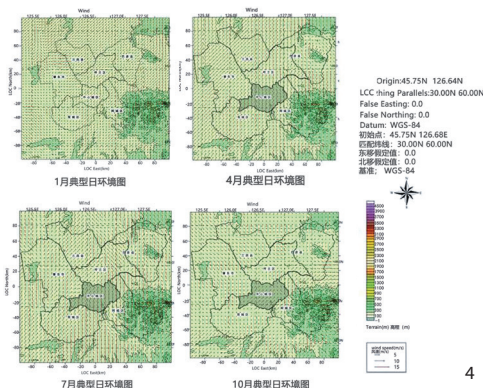
1 研究区域地表覆盖数据图
ArcGIS land cover data of research district



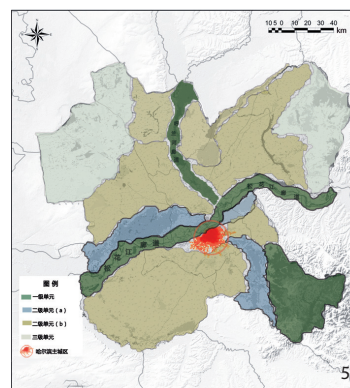
2 绿色基础设施空间单元识别图
Spatial unit of green infrastructure



3 哈尔滨典型月份风向统计图
Wind frequency diagram of classical months, Harbin



4 CALMET 风场模拟分析
Wind field simulation and analysis by CALMET



5 绿色基础设施空间分布图
Spatial pattern of green infrastructure based on air circulation analysis

偏北风交替变更。根据《哈尔滨市志（1961—1990）》以及中国气象资料 2012—2015 年间共 4 年每月风速及大风日数气象资料进行整理，计算得出每月的平均风速及大风日数，以此分析选取 1、4、7、10 这 4 个月作为哈尔滨一年四季的典型气候代表月份。

根据以上资料统计，哈尔滨年平均风速为 3.5m/s。春季典型月份 4 月主导风向为西南风，平均风速为 3.53m/s，夏季典型月份 7 月主导风向为西南风、南风，平均风速为 4.125m/s，秋季典型月份 10 月主导风向为西北风、西风、西南风，平均风速为 3.31m/s，冬季典型月份 1 月主导风向为西北风、西南风，平均风速为 3.25m/s（图 3）。

对哈尔滨城市区域尺度进行 CALMET 风环境模拟计算，并根据每月的风环境模拟计算成果，得到每个月份的典型日风环境图。从模拟计算成果来看，地形条件对城市风环境也有较大影响，即当区域主导风向为西南向或南向时，处于平原地区的哈尔滨受东南部张广才岭山脉的影响，在局地环流作用下城市东部会受到东南风的作用（图 4）。

3.3 空间体系表达

研究结果显示，大气风速对城市空气污染物的扩散速度影响重大。根据空气污染物扩散速度，可以将大气风速分为 3 个等级^[3, 20]：一是大风状态下（ $V_{\text{大气}} > 5.5 \sim 6\text{m/s}$ ），空气流通速度快，城市不依赖周边的生态斑块也能改善空气质量；二是微风状态下（ $5.5 \sim 6\text{m/s} > V_{\text{大气}} > 1.5 \sim 2\text{m/s}$ ），如果在城市的上风向分

布能提供大量新鲜空气斑块，则有利于迅速改善城市的空气质量；三是城市处于静风状态下（ $V_{\text{大气}} < 1.5 \sim 2\text{m/s}$ ），这种风场条件下城市污染物扩散缓慢，城市周边的新鲜空气难以进入城市，GI 中的气候调节斑块此时发挥重要作用，可以加快城市空气的流通。由此可以发现，在微风和静风的风场条件下，GI 的空间分布对城市空气质量的改善发挥着重大作用。

根据哈尔滨一年中不同季节的风环境情况，结合绿地在城市周边的空间分布情况，判断其对城市空气质量产生的影响与发挥的作用，对区域内的生态单元做出进一步的筛选与分类，得到绿色基础设施的空间体系（图 5）；按照功能与重要性的差别将 GI 分为 3 级单元，结果如下：

1) I 级单元 3 个，其中松花江廊道和呼兰河廊道是重要的城市新鲜空气供给源，同时也是冷空气生成源，在调节城市气候中影响重大；区域东南部的山区林地产氧量，处于城市夏秋冬主导风向的上方向，是城市重要新鲜空气供给源。

2) II 级单元 7 个，其中城市东北、西北、东南方的 3 个带状水田为 2 级 a 斑块，是区域内的冷空气生成源，可以调节城市气候并提供一定量新鲜空气；城市周边的 4 个块状旱田为 2 级 b 斑块，可以为城市提供新鲜空气。

3) III 级单元 2 个，分别为城市西北部的草地、湿地斑块和东北部的林地斑块，这 2 个斑块有较强的新鲜空气提供能力，但距离城

市较远或处于城市主导下风向，对城市的影响较弱。

4 规划应用

根据 GI 的空间分布体系，对哈尔滨周边重要生态绿地的保护与建设提出以下规划建议：

1) 松花江与呼兰河沿江绿地与湿地构成的带状生态廊道是哈尔滨城区最主要的新鲜空气提供源地和冷空气生成源地，在城市的建设与扩张中应重点保护，生态廊道中应加强湿地生态修复，提高绿量以强化新鲜空气的供给能力。

2) 城市东南侧的阿什河生态廊道是中心城区重要的新鲜空气输送廊道，应在城市开发中避免对廊道的侵占，并保持一定的廊道宽度（建议 200m 以上）。

3) 西北、西南方向是哈尔滨春夏秋 3 个季节的主导风向，在城市西北、西南这 2 个区域内缺乏大型的生态斑块，建议在未来的规划中建设吸碳放氧能力强的林地斑块，为城市提供更多的新鲜空气。

4) 根据《哈尔滨市城市总体规划（2004—2020）》，城市周边的 8 个楔形绿地中，东南侧的呼兰河绿地和西南侧的阿什河绿地以及松花江廊道是城市的重要新鲜空气补给通道，对城市空气质量的改善意义重大，应重点保护。

5 结论

区域尺度下城市周边的绿色基础设施对

城市风环境与空气质量影响巨大，不同的GI斑块不仅可以为城市提供新鲜空气，净化大气中的有害物质，还在区域内冷空气生成、改变城市局地环流和加速空气运动中发挥着重大作用。通过研究，论文取得如下成果：

1) 在没有城市气候图的情况下，依据城市气候资料和 CALMET 风场模拟分析，得到城市典型月份的风环境图；

2) 根据局地环流理论，提出了区域尺度下影响城市风环境的绿色基础设施的识别方法，即空间单元识别—城市气候分析—空间体系表达 3 个步骤；

3) 以哈尔滨作为研究案例，识别出影响城市风环境的绿色基础设施空间体系，并对城市绿地保护、城市风道规划提出了相应的策略与建议。

研究提供了宏观尺度下分析绿色基础设施空间分布对城市空气质量影响的技术方法。研究成果为区域内核心生态资源的保护与修复、城乡绿地系统规划等提供了依据，并可以在城市周边限建区的划定、城市生态廊道和城市风道规划设计、城市绿线蓝线划定与调整等不同领域得到进一步的应用。

城市风环境是一个有挑战性的研究课题，城市空气环流的生成与变化受到众多因素的制约，其相互间的作用与影响机制也非常复杂。受条件所限，研究还有很多不足与不深入的地方，希望能借此抛砖引玉，共同为改善我们城市的空气质量作出贡献。

注释：

①图 1 由张建波、吴冰绘制，图 2、5 由吴远翔绘制，图 3、4 由袁雪娇、吴远翔绘制。感谢邹敏同学的后期图片处理。
②表 1 来源于谢高地的研究论文《中国生态系统服务的价值》。

参考文献 (References):

[1] 朱亚澜, 余莉莉, 丁绍刚. 城市通风道在改善城市环境中的运用 [J]. 城市发展研究, 2008 (1) : 46-49.
Zhu Yalan, Yu Lili, Ding Shaogang. The Application of Urban Ventilation Channel for Urban Environment Improvement [J]. Urban Studies, 2008(1): 46-49.
[2] 李鹏, 余庄. 基于气候调节的城市通风道探析 [J]. 自然资源学报, 2006 (6) : 991-997.
Li Kun, Yu Zhuang. Research on Based Urban Ventilation Channel on Climate Regulation [J]. Journal of Natural Resources, 2006(6): 991-997.
[3] 李军, 荣颖. 城市风道及其建设控制设计指引 [J]. 城市问题, 2014, 230 (9) : 42-47.

Li Jun, Rong Ying. Urban Ventilation Channel and Its Construction Control Design Guidelines [J]. Urban Problems, 2014, 230(9): 42-47.
[4] 任超, 袁超, 何正军, 等. 城市通风廊道研究及其规划应用 [J]. 城市规划学刊, 2014, 216 (3) : 52-60.
Ren Chao, Yuan Chao, He Zhengjun, et al. A Study of Air Path and Its Application in Urban Planning [J]. Urban Planning Forum, 2014, 216(3): 52-60.
[5] 翁清鹏, 张慧, 包洪新, 等. 南京市通风廊道研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (11) : 89-94.
Weng Qingpeng, Zhang Hui, Bao Hongxin, et al. Study on Ventilation Channels of Nanjing City [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(11): 89-94.
[6] 李军, 荣颖. 武汉市城市风道构建及其设计控制引导 [J]. 规划师, 2014, 30 (8) : 115-120.
Li Jun, Rong Ying. Urban Design Control For Wind Corridor: Wuhan Case [J]. Planners, 2014, 30(8): 115-120.
[7] 洪亮平, 余庄, 李鹏. 夏热冬冷地区城市广义通风道规划探析——以武汉四新地区城市设计为例 [J]. 中国园林, 2011 (2) : 39-43.
Hong Liangping, Yu Zhuang, Li Kun. Study on Grand Urban Wind Way Planning in Hot Summer and Cold Winter Area—Case Study of the City Design of Sixin Area of Wuhan [J]. Chinese Landscape Architecture, 2011(2): 39-43.
[8] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评 [J]. 城市规划, 2012, 36 (5) : 84-90.
Pei Dan. Review of Green Infrastructure Planning Methods [J]. City Planning Review, 2012, 36(5): 84-90.
[9] 刘娟娟, 李保峰, (美) 南茜·若, 等. 构建城市生命支撑系统——西雅图城市绿色基础设施案例研究 [J]. 中国园林, 2012 (3) : 116-120.
Liu Juanjuan, Li Baofeng, (American) Nancy Ro, et al. Constructing Life Support System in Urbanized Area: A Case Study of Urban Green Infrastructure in Seattle [J]. Chinese Landscape Architecture, 2012(3): 116-120.
[10] 王绍增, 李敏. 城市开敞空间规划的生态机理研究(下) [J]. 中国园林, 2001 (5) : 32-36.
Wang Shaozeng, Li Min. Studying on the Principle of Open Space Eco-logical Planning [J]. Chinese Landscape Architecture, 2001(5): 32-36.
[11] 冯娟慧. 城市绿地与风的环境效应研究 [J]. 中国园林, 2010 (2) : 82-85.
Feng Xianhui. Study of the Environmental Effects of Urban Green Space and Wind [J]. Chinese Landscape Architecture, 2010(2): 82-85.
[12] 许克福, 张浪, 傅莉. 基于城市气候特征的城市绿地系统规划 [J]. 华中建筑, 2008 (11) : 177-181.
Xu Kefu, Zhang Lang, Fu Li. Planning of Urban Green Space System Based on Urban Climate Feature [J]. Huazhong Architecture, 2008(11): 177-181.
[13] 贾行飞, 戴菲. 我国绿色基础设施研究进展综述 [J]. 风景园林, 2015 (8) : 118-124.
Jia Xingfei, Dai Fei. Review of Progress in Research on Green Infrastructure in China [J]. Landscape Architecture, 2015(8): 118-124.
[14] 任超, 吴恩融, K Lutz, 等. 城市环境气候图的发展及其应用现状 [J]. 应用气象学报, 2012, 23 (5) : 593-603.
Ren Chao, Wu Enrong, Katzschnher Lutz, et al. The Development of Urban Climatic Map and Its Current Application Situation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5): 593-603.
[15] 赵敬源, 宋晓明, 刘加平. 城市气候环境图集的内容

与应用 [J]. 城市科学, 2010 (7) : 19-22.
Zhao Jingyuan, Song Xiaoming, Liu Jiaping. Contents and Application of Atlas of Urban Climate and Environment [J]. Urban Science, 2010(7): 19-22.
[16] 宋代风, 刘姝宇, 王绍森. 斯图加特城市气候地图评述与启示 [J]. 城市发展研究, 2015, 22 (12) : 1-7, 19, 125.
Song Daifeng, Liu Shuyu, Wang Shaosen. The Review and Implication of Urban Climatic Map in Stuttgart [J]. Urban Development Studies, 2015, 22(12): 1-7, 19, 125.
[17] 赵红斌, 刘晖. 盆地城市通风廊道修建方法研究——以西安市为例 [J]. 中国园林, 2014 (11) : 32-35.
Zhao Hongbin, Liu Hui. Research on the Methods of Building Ventilation Corridors among Basin Cities—Taking the City of Xi'an as the Example [J]. Chinese Landscape Architecture, 2014(11): 32-35.
[18] 张晓钰, 郝日明, 张明娟. 城市通风道规划的基础性研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (12) : 257-261.
Zhang Xiaoyu, Hao Riming, Zhang Mingjuan. The Planning and Establishment of Urban Ventilation Path [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(12): 257-261.
[19] 刘姝宇, 沈济黄. 基于局地环流的城市通风道规划方法——以德国斯图加特市为例 [J]. 浙江大学学报·工学版, 2010, 44 (10) : 1985-1991.
Liu Shuyu, Shen Jihuang. Urban Ventilation Channel Planning Method Based on Local circulation: A Case Study of Stuttgart, Germany [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(10): 1985-1991.
[20] 杨立新. 编制城市绿地系统规划时应采用软微风玫瑰图 [J]. 中国园林, 2013 (9) : 65-69.
Yang Lixin. The Soft-breeze Rose Diagram as the Main Base in Urban Green Space System Planning [J]. Chinese Landscape Architecture. 2013(9): 65-69.
[21] 曹靖, 黄闯, 魏宗财, 等. 城市通风廊道规划建设对策研究——以安庆市中心城区为例 [J]. 城市规划, 2016, 40 (8) : 53-58.
Cao Jing, Huang Chuang, Wei Zongcai, et al. Urban Ventilation Corridor Planning Strategies: A Case Study on Central Urban Area of AN QING [J]. City Planning Review, 2016, 40(8): 53-58.
[22] 余庄, 张辉. 城市规划 CFD 模拟设计的数字化研究 [J]. 城市规划, 2007, 31 (6) : 52-55.
Yu Zhuang, Zhang Hui. Digital Model of CFD Simulation Design In Urban Planning [J]. City Planning Review, 2007, 31(6): 52-55.
[23] 王文勇, 陈楠. 山区风场的 WRF/CALMET 模式模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2010, 45 (6) : 990-996.
Wang Wenyong, Chen Nan. WRF/CAIMET—Based Wind Field Simulation of Mountain Regions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(6): 990-996.
[24] 马明亮, 张加昆, 魏鸿业, 等. 基于 CALMET 对复杂地形下风场的模拟研究 [J]. 青海环境, 2010, 20 (4) : 181-184.
Ma Mingliang, Zhang Jiakun, Wei Hongye, et al. Research on Simulation of Wind Field for Complex Terrain Based on CALMET [J]. Journal of Qinghai Environment, 2010, 20(4): 181-184.
[25] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值 [J]. 资源科学, 2015, 37 (9) : 1740-1746.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The Value of Ecosystem Services in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.

(编辑 / 张雯娟)