

匡文慧.城市土地利用/覆盖变化与热环境生态调控研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(10):1643-1652.[Kuang Wenhui. Advance and Future Prospects of Urban Land Use/Cover Change and Ecological Regulation of Thermal Environment. Scientia Geographica Sinica,2018,38(10):1643-1652.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.10.008

# 城市土地利用/覆盖变化与热环境生态 调控研究进展与展望

匡文慧

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**城市土地利用/覆盖变化(LUCC)与热环境生态调控是城市生态学和城市气候适应性关注的热点问题。在提出城市LUCC/空间结构与生态服务热调节功能连接的重要性的基础上,综述了城市土地利用变化、城市绿色基础设施在热岛减缓和气候适应性发挥的作用,评述了观测实验、定量遥感和过程模型方面以及热调控的进展情况。基于此认为,局地或区域尺度城市高精度结构组分高精度遥感探测方法、城市高精度下垫面多尺度(功能区/覆盖组分/构造或材质等)对局地气温和辐射能量平衡影响机理和定量贡献识别、城市生态系统热调节功能的城市地表结构组分调控阈值确定、以及区域或全球尺度城市土地利用/覆盖变化影响的生物地球物理机制制定量化认知等,是未来重要的发展方向。

**关键词:**城市土地利用/覆盖变化;城市热岛;热环境生态调控;气候适应性;不透水地表;定量遥感

**中图分类号:** TU984.11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2018)10-1643-10

城市生态服务功能直接影响城市人居环境和人类福祉<sup>[1]</sup>。在当前乡村人口不断向城市集聚、城市快速向外扩张加之全球环境变化加速(温度升高、洪水及热浪加剧)的影响下,城市生态服务功能正面临着前所未有的挑战<sup>[2,3]</sup>。城市热环境生态调控以城市地理学、城市气候学和城市生态学等多学科理论方法为基础,耦合“空间区位理论”“等级理论”和“辐射能量平衡理论”,综合应用遥感地面同步观测、GIS空间分析以及机制模型,核定服务于城市热岛减缓与局地气候热调节服务功能的城市内部空间组分的调控阈值<sup>[4]</sup>。城市热环境生态调控功能作为重要的生态调节服务功能之一,对城市居民健康和宜居有深刻影响<sup>[5,6]</sup>。城市不透水地表(Impervious Surface Area, ISA)与绿地格局(Green Space),作为城市土地利用/覆盖结构特征的重要组合模式,会对地表辐射与能量的分配方式产生不同甚至截然相反的作用,进而对城市热岛、大气环境及局地气候产生重要影响,从而对城

市生态服务热调节功能产生决定性作用<sup>[2,7]</sup>。

21世纪以来,中国城市以每年1 788 km<sup>2</sup>的速度对外扩张,其中以高密度不透水地表扩张为主<sup>[8]</sup>。2012年约50%(约6亿)人口居住在城市,约占6×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>国土面积<sup>[9,10]</sup>,如何统筹布局好城市用地面积,实现城市内部生活空间、生产空间、服务空间和生态空间格局优化组合,事关国家整体城镇化发展的质量。进入21世纪,国家强调加快新型城镇化建设,提升城镇化质量,优化空间格局,推进生态文明建设。承载高密度的人口、产业的都市用地如何有效布局,以实现城市生活空间、生产空间、服务空间与生态空间的不透水地表、绿地组分与结构的合理布局,对于提高城市生态服务功能、改善人居环境质量、建设低碳型生态城市,乃至提高全球气候变化的适应能力具有重要的现实意义。

城市不透水地表与绿地格局通过改变城市下垫面结构,引起地表反照率、比辐射率、地表粗糙

**收稿日期:** 2018-05-22; **修订日期:** 2018-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(41590842)、北京市自然科学基金重点项目(8171004)资助。[Foundation: Major Projects of the National Natural Science Foundation of China (41590842), Key Projects of Beijing Natural Science Foundation (8171004).]

**作者简介:** 匡文慧(1978-),男,内蒙古乌兰察布人,副研究员,博士,主要从事土地利用/覆盖变化和城市生态环境研究。E-mail: kuangwh@igsnrr.ac.cn

度的变化,从而对区域垂直方向辐射平衡产生直接影响。具体而言,不透水地表会增强地表显热通量,城市绿地会增加潜热通量,从而加剧或减缓城市热岛强度改变局地/区域气候,影响城市生态服务功能,特别是热调节功能<sup>[11]</sup>。当前国内外研究仍缺乏具有空间针对性的城市内部功能结构组合(特别是土地利用等级尺度空间格局)与生态服务功能(热调节功能)之间的紧密结合和统筹考虑<sup>[12]</sup>。因此,加强城市土地利用/覆盖变化与热环境生态调控及气候适应性研究,有助于提高城市土地覆盖组合结构与地表覆盖能量平衡互馈关系内在机理性认知能力,加深对城市化与全球环境变化生物地球物理机制重要科学问题的理解。定量评估城市地表覆盖格局对城市生态系统服务热调节功能胁迫关系,是解答城市热环境从“科学量测”向“科学调控”发展的关键科学问题,可以为优化城市生产、生活、服务和生态空间布局,控制城市适度规模以及城市生态规划与整治提供科学参考。

## 1 城市空间结构与生态服务热调节功能的连接与重要性

城市空间结构历来是人文地理学关注的焦点问题。16世纪英国学者摩尔(More)提出了乌托邦式的城市建设模式<sup>[13]</sup>,19世纪末英国科学家霍华德(Howard)提出田园城市(Garden City)思想<sup>[14]</sup>,更强调公共绿地布局与生态城市建设理念,对现代城市规划思想起了重要的启蒙作用。在现代城市发展中,城市空间结构布局中商业、工业等产业用地,住宅用地以及城市绿地如何有机组合?城市建筑红线(不透水地表面积比例)、生态绿线(绿地)和蓝线(水域)如何调控?如何在城市有限空间中调节局地气候、改善人居环境、减缓城市污染,营造良好生态环境?仍有待于城市规划科学、城市土地利用科学、城市生态学、城市气候学等自然和社会科学协同解答<sup>[15,16]</sup>。

城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)是人类活动对城市气候环境系统产生的最显著影响之一。1833年Howard通过对伦敦城区和郊区的气象进行对比观测,首次对城市中心温度高于郊区的现象进行了文字记载<sup>[17]</sup>。Manley于1958年提出城市热岛(UHI)的概念<sup>[18]</sup>。城市不同土地利用类型会改变城市局地大气和地表与其周围的郊区温差,因而过度和无序的城市扩张使土壤和植被表

面转变为城市不透水地表(如混凝土、沥青等)是引起城市热岛效应的主要原因,从而产生全球性的负效应<sup>[19]</sup>。城市热环境生态调控是减缓城市热岛效应的有效手段之一,该方法通过地表热环境要素的差异来识别城市不同土地利用/覆盖类型的热贡献,提出有利于热岛强度减缓的城市内部空间结构和组分,进而优化城市空间格局<sup>[4]</sup>。

从城市内部不同功能区到相应的不透水地表、绿地覆盖状态,再到城市建筑、道路、广场等类型是城市生态系统的重要研究内容<sup>[20]</sup>,不同等级结构组合与城市人为热源、潜热、显热等热通量之间具有直接关系(图1),由此衍生2个关键科学命题:①针对特定超大城市,城市内部不透水地表和绿地2种主导覆盖类型,其格局和组分对空间热场热通量特征影响机理及生态服务热调节功能定量贡献程度如何?②针对城市生活、生产、服务和生态空间,什么样的土地覆盖格局有利于减缓城市热岛强度,改善城市生态系统服务功能?

## 2 城市土地利用/覆盖变化与热环境研究进展

### 2.1 城市土地利用/覆盖变化

城市土地利用是城市内部与外部社会、政治、经济、技术等多种因素作用的结果,也是影响城市发展的要素在城市土地上的反映<sup>[21,22]</sup>。城市土地覆盖反映了地表不同类型自然状态,包括城市不透水地表、绿地、水域和裸土等。城市不透水地表(Urban Impervious Surface, UIS)是由城市发展建设产生的一种地表水不能直接渗透到土壤的人工地貌特征,包括城市中的道路、广场、停车场、建筑屋顶等<sup>[23]</sup>。城市不透水地表作为城市空间结构的重要组成部分,直接影响着城市生态系统服务功能,是反映人类活动强度和评价城市人工建设用地增长的重要指标<sup>[24,25]</sup>,对于评价城市生态系统健康程度与人居环境质量具有重要的理论与现实意义。遥感手段由于其多时段、大范围等特性,成为提取城市不透水地表信息的主要方法<sup>[26]</sup>。Ridd<sup>[27]</sup>构建了基于遥感信息的V-I-S(Vegetation-Impervious Surface-Soil)概念模型,该模型将城市土地覆盖分为绿地植被、不透水地表与裸土,模型建立对于解决混合像元问题,提高不透水地表信息提取的精度具有重要作用。此类方法在研究中得到广泛的应用<sup>[28]</sup>。

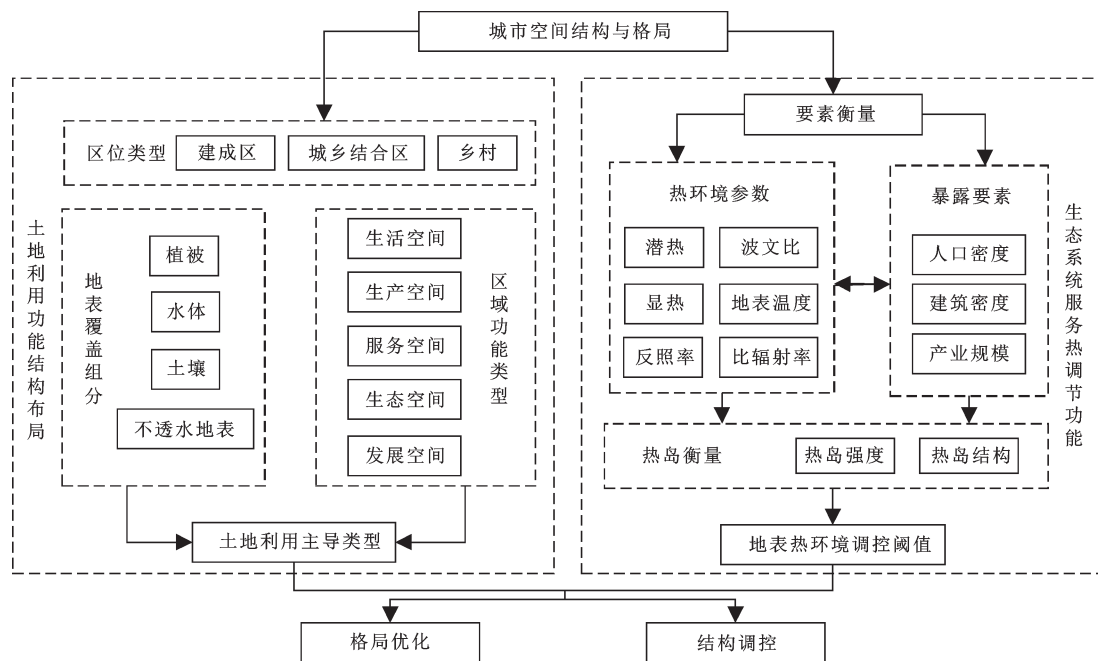


图1 城市等级空间结构与生态服务热调节功能相互作用关系

Fig. 1 The relationship between hierarchical structure and ecological regulation in cities on thermal environment

世界上主要地区和城市,不透水地表呈现出增长趋势。遥感监测结果表明,美国城市内部不透水地表面积比例平均约为40%~50%,中国城市不透水地表面积比例估算约为66%,且均呈现出高速增长的特征<sup>[28]</sup>。不透水地表的生长通过改变地表辐射能量平衡,从而增强局地气温,产生热岛效应<sup>[29]</sup>,进而影响居民的舒适性和健康状况,以及污染物排放等。中国学者逐渐意识到城市不透水地表分布对生态环境影响的重要性,进而对北京、上海、福州、珠三角等城市和地区不透水地表开展相关研究<sup>[30, 31]</sup>。前人研究由集中于城市扩张及其相应的土地利用变化,逐渐转为城市内部城市土地组分提取,在此情景下,更加需要等级结构土地利用精细化分类。

## 2.2 定量遥感、观测实验与过程模型集成研究

在欧洲和美国,很多城市都开展了相应的观测试验和计划,甚至形成了全球城市通量观测网络<sup>[32, 33]</sup>。美国的巴尔的摩(Baltimore)和凤凰城(Phoenix)均开展了长期城市生态研究,建立了通量和气象观测站点<sup>[34]</sup>。国内城市相继也开展了相关的观测研究,例如在南京进行的城市边界层三维结构和热岛三维结构观测试验,定量分析城市微气象及中小尺度、非均一三维特征对地表与大

气间能量交换的影响,并对城市热岛的特征及其成因、影响程度开展研究<sup>[35]</sup>。中国科学院大气物理研究所在北京城区建造了325 m气象观测塔应用涡动相关方法开展47 m、120 m和280 m城市下垫面的动量和感热等湍流通量观测实验<sup>[36]</sup>。中国科学院生态环境研究中心在本单位地址和北京植物教学中心开展了辐射和气象观测<sup>[34]</sup>。为了建立城市不透水面和绿地不同土地利用类型与地表辐射和热通量之间的直接关联,匡文慧等<sup>[29]</sup>在北京城区奥林匹克公园(代表城市绿地)和附近科学园南里建筑屋顶(代表城市不透水地表)布设了涡度相关通量实验观测站,比较相同气象条件下不同城市结构类型对地表辐射和通量影响的差异。

当前地表热量平衡模拟模型有SEBS(Surface Energy Balance System)、SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)、PCACA(Pixel Component Arranging Comparing Algorithm)和能量切割法等<sup>[37]</sup>。耦合陆表模型或城市冠层模型,在中尺度区域上形成的MM5(Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)、RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)、WRF(Weather Research and Forecasting Model)等。Grimmond等<sup>[38, 39]</sup>在全球范围内开展了城市能量平衡的模型比较计



划,涉及到的模型有LUMPS(Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme)、BEP02(Building effect Parameterization)、CLMU(Community Land Model-urban)、MUCM(Multi-layer Urban Canopy Model)、NJU-UCM-S/M(Nanjing University Urban Canopy Model-single/multi Layer)、SM2-U(Soil Model for Sub-Mesoscale Urban)、TEB(Town Energy Balance)等数十个模型。它们既包括了单层模型,也包括了多层模型;既有中尺度下的模块,也有单独的城市气候模型,既有半经验模型,也有基于数值模拟的模型。针对城市生态评价模型有美国林业组织开发的Citygreen模型等。

城市生态学理论研究一再强调理解和分析城市生态系统的复杂性:包括空间格局和结构组成的异质性对生态过程和服务功能的影响机制。Pickett等<sup>[40]</sup>和Grimm等<sup>[41]</sup>呼吁发展新一代的空间显式的多尺度生态系统模型,以将人类控制下的格局动态和环境干扰同生物地球化学循环过程有机整合。基于Wu等<sup>[12]</sup>提出的HPDM-PHX(Hierarchical Patch Dynamics Model of the Phoenix urban landscape)城市模型框架,Zhang等<sup>[42]</sup>发展了多尺

度耦合的HPM-UEM(Hierarchical Patch Mosaic-Urban Ecosystem Model)模型,这些模型主要针对城市生物地球化学过程。但是长期以来缺乏将城市空间等级尺度结构与生物地球物理机制相互有效联系起来的研究方法和案例。城市作为一个高度空间异质性和多因素耦合的复杂有机体,在城市土地利用/覆盖变化和热环境调控方面仍有待通过观测实验、过程模型模拟和定量遥感集成方法深入解决如下问题(图2):对城市内部空间异质性和破碎化程度,特别是不透水地表和绿地结构的有效镶嵌,以及建筑三维空间峡谷效应、立体受光表面积增加和建筑阴影对生态系统热调节影响机制认识;它们对城市热辐射的扩散、阻挡、挤压、传导、波动等效应;以及与之交互的大气污染、人为热源排放对城市生态系统热调节影响的拮抗、胁迫、消长和适应作用机制综合效应。

### 2.3 城市绿色基础设施在热岛减缓和气候适应性方面发挥的作用

城市绿地(Urban Green Space, UGS)作为城市生态系统的重要组成部分,在改善城市环境,特别是空气和水质净化,建筑节能,适宜空气温度,紫

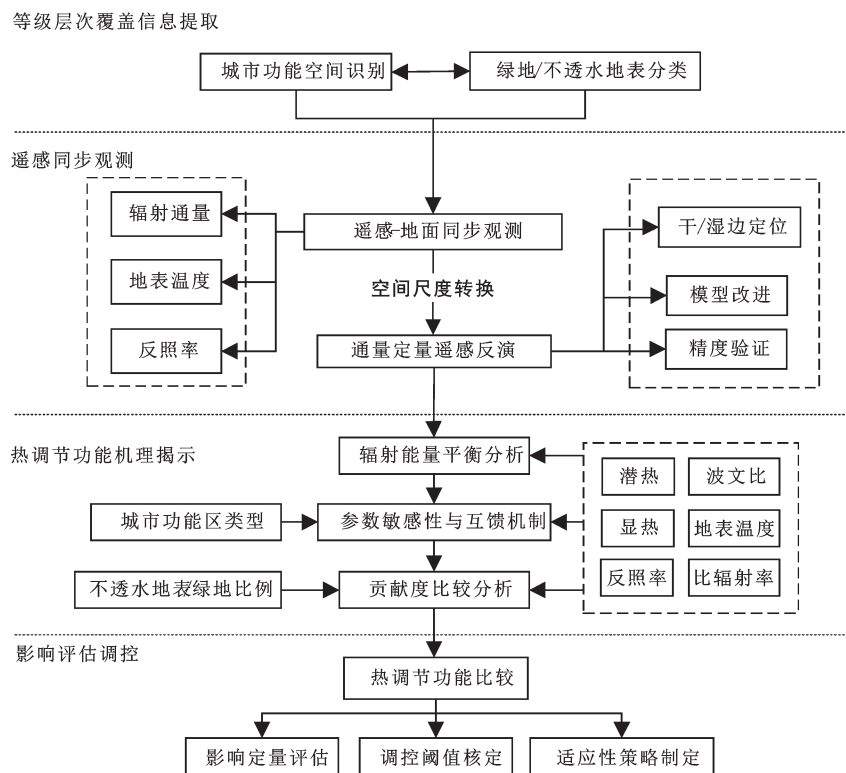


图2 定量遥感、观测实验与过程模型集成研究框架与方法

Fig. 2 Integrated methods of quantitative remote sensing, observational experiments and process models

外线减少方面具有重要作用<sup>[43,44]</sup>。城市中适宜比例的绿地面积有调节城市内部气候环境,影响城市内部辐射能量平衡,降低城市地表温度等作用,对生态服务热调节功能具有决定性作用<sup>[45-47]</sup>。通过仪器测量方法分析公园绿地对周边区域的温度影响,发现绿地温度明显低于周边区域<sup>[47]</sup>,且面积越大,植被覆盖越高的绿地冷岛效应越明显<sup>[48]</sup>。研究表明,增加10%的绿地,城市热辐射将减少2℃,当绿地斑块面积大于5 km<sup>2</sup>,地表辐射温度急剧下降<sup>[48]</sup>。绿地和周边城市温度差异夏季大,冬季小,冷岛效应可以在夜晚的城市区域延伸200~300 m,而夏季8~10月间,范围可以超过500 m<sup>[49]</sup>,有效地降低了城市温度。中国城市不透水地表比例过高,绿地面积不够集中,较大程度上影响了城市热调节功能。

为进一步保护城市内部绿地覆盖,美国已实施了不同的城市绿地发展计划,如种植大量绿地植被<sup>[50,51]</sup>、保护现有植被<sup>[52]</sup>和发展城市冠层目标<sup>[53]</sup>等。针对城市内部不透水与森林覆盖结构组分研究,国际林业研究组织联盟(International Union of Forestry Research Organizations, IUFRO)曾建立专门的项目组来探讨人类居住区的绿地和城市森林覆盖方面的问题<sup>[54]</sup>。2000年以来,欧洲、中国等多个国家政府以绿地结构和城市规划为研究内容,展开专项科研计划<sup>[55,56]</sup>。国内外绿地植被对缓解城市热岛效应的作用研究证实了公园绿地的“冷效应”和不透水层的“热效应”<sup>[57-59]</sup>。不仅如此,已有研究表明部分位于热带荒漠环境中的城市,由于城市内部大面积的灌溉植被增加了地表蒸散发,进而呈现城市“冷岛效应”<sup>[60,61]</sup>。多项研究证明绿地和水体具有缓减热岛效应的作用,但是针对一定面积的绿地或水体具体的影响范围的量化研究不多,而绿地和水体的结构、配置等对热效应的调节作用,需要深入研究<sup>[62]</sup>。

## 2.4 城市地表热环境生态调控阈值

人类活动对自然界的影响强度呈现出逐渐增大的趋势,其中,不合理活动将会导致生态环境恶化,为了维持区域环境与经济的可持续发展,需要对生态环境进行调控<sup>[63,64]</sup>。城市化进程的加快,严重地影响生态系统的服务功能,使城市自然生态系统的服务功能不断降低。世界各地政府制定不同的生态调控策略,保护城市生态环境。1938年,英国伦敦实施“绿带法”(Green Belt Law),建设城市绿

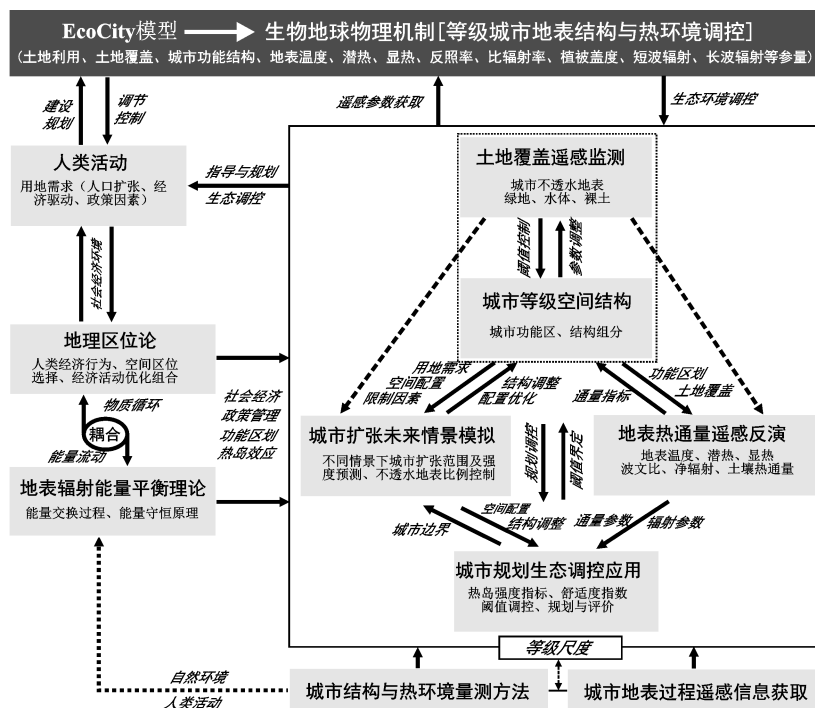
地,控制城市规模<sup>[65]</sup>。该模式在一系列城市中得到推广<sup>[66,67]</sup>。欧洲实施泛欧洲生态网络(Pan European Ecological Network, PEEN)计划,建立覆盖欧洲的生态网络,实现对区域生态环境的系统保护<sup>[68]</sup>。中国政府在城市中推动“五规合一”,统一进行城市规划,以解决包括环境问题在内的诸多问题,而生态调控阈值,在其中扮演着“底线”的重要角色<sup>[69]</sup>。国内学者逐渐认识到城市生态问题的重要性,对深圳等城市化区域和京津冀等区域的生态调控问题,进行了各种方面的研究<sup>[70,71]</sup>。李杨帆等以厦门市为例,通过景观格局识别分析,结合生态风险预警方法,进行关键区域识别<sup>[72]</sup>。匡文慧等提出热岛效应与极端热事件发生的生态风险缓减的城市内部功能布局调控策略,发展了EcoCity V1.0模型(图3)<sup>[4]</sup>。通过对不同功能区城市不透水地表面积比例进行有机调控,EcoCity V1.0模型对于未来城市扩张过程中不同功能区城市热岛缓解具有广泛的应用前景。

以雄安新区规划为例,在2017年4月1日,中共中央、国务院决定设立雄安新区,作为一项千年大计、国家大事,对于集中疏解北京非首都功能和调整优化京津冀城市布局 and 空间结构具有重大意义。4月8日研究组基于EcoCity V1.0模型应用于未来雄安新区的规划,分析结果撰写提交了“中科院专家关于加强河北雄安新区建设区域生态管控的建议”,提出需要加强城市绿色基础设施建设,适当提高城市绿化比例,建成区内不透水地面整体比例应不超过50%,核心区不超过70%,通过科学规划,热岛强度应控制在1℃~1.5℃<sup>[71]</sup>。相关建议获得中办采纳,并与《河北雄安新区规划纲要》相关指标具有较高的契合性。可见,EcoCity V1.0模型在优化未来城市布局 and 空间规划中有很好的应用前景。

## 3 未来研究展望——从“城市热岛”到“热调节服务功能”

城市化与极端热、热岛效应、大气污染以及气候变化适应性问题逐渐得到学术界的重视。城市极端热事件发生的频率呈现加剧态势,全球范围未来有更多人口暴露或死于极端热、户外大气污染(PM2.5)<sup>[73,74]</sup>。同时,城市化导致气温日较差缩小(Diurnal Temperature Range, DTR),大都市区及湿润地带受热岛影响更为剧烈<sup>[75,76]</sup>。

千年生态系统评估(Millennium Ecosystem As-

图3 EcoCity V1.0模型结构框架<sup>[4]</sup>Fig. 3 Structure of the EcoCity model<sup>[4]</sup>

essment, MA), 城市化与全球环境变化(Urbanization and Global Environmental Change, UGEC)直到未来地球计划(Future Earth)更加关注城市生态系统服务功能的提升和人类幸福安康。由此,低影响开发(Low Impact Development, LID)、弹性城市(Resilient City)、海绵城市建设成为近期学术探讨和应用实践优先主题和热点问题<sup>[77,78]</sup>。学界提出通过城市绿色基础设施(Urban Green Infrastructure, UGI)建设适应气候变化,屋顶绿化、透水砖、雨洪设施等,会截流、滞流降水,降低能耗,降温,缩减热岛,缩减温室气体排放,由此,相互之间综合效应量测和评估是至关重要的<sup>[79]</sup>。Jones等<sup>[80]</sup>提出基于生态系统适应性(Ecosystem-based approaches to Adaptation, EbA)策略,与之密切相关的城市生态系统热调节机理研究,是提高城市生态系统服务认识的最核心和关键环节,也是城市生态系统物质能量循环研究的基础和前沿内容。联合国2030年可持续发展议程提出城市可持续性发展,提出建设更好的人居环境,亟需对城市绿地比例进行合理调控。

当前,对城市生态系统热调节和气候适应性研究更加重视城市生态服务功能以及人居环境的

改善,特别在城市对全球气候变化的适应性策略。在学科协同方面,由传统的单一科学,转向社会科学与自然科学的耦合和多学科交叉,协同解决城市土地利用动态过程与生态系统服务功能之间的互馈过程、作用机理以及人文-生态的集成研究<sup>[16]</sup>。但当前研究中仍需要在如下研究方向深入:

1) 城市不透水地表/绿地格局对热岛/冷岛效应通量特征影响机理认识。热岛强度表达了城市中心区高于周边乡村地表气温的强度,虽然表达了城市热岛现象,但更多反映的是热岛效应这一现象本身,解释其内在机理以及产生的原因仍显不足。进而,围绕联合国2030可持续发展目标,在未来城市扩张模式和未来气候情景下,人工下垫面大规模的建设对区域增温的影响,特别是高密度大都市集聚区夏季极端热过程和对热舒适性的影响幅度。

2) 支持城市内部功能结构以及生态服务功能评估的数据资料的精细化。城市内部结构精细化信息获取具有一定难度。城市生态/气候模型的适用性缺乏充分的参数本地化和验证工作。将国际模型本土化,开发城市地表过程热通量遥感反演模型,通过科学实验与模型模拟的有效结合,进一步提高模型的可靠性和模拟精度,是当前研究



亟待解决的问题。

3) 城市结构与城市生态服务功能之间的定量关系认识水平,会影响城市规划及景观设计方面的应用能力。对于解答具有空间针对性的不透水地表和绿地规模、组分以及格局与热调节功能之间的互馈关系,从而使城市热环境研究从“科学量测”向“科学调控”发展。

4) 全球气候变暖背景下,区域尺度极端气候(如极端热、洪水)对于城市生态系统服务影响和适应性策略认识能力的提升。

城市作为重要的人工生态系统,在超大城市地区或城市群地区极易形成高密度高人工不透水指数的集聚连绵的下垫面特征,一定程度会增加城市生态安全的风险性<sup>[80-82]</sup>。城市布局的功能区、各功能区不透水地表和绿地面积比例控制等级结构的分类体系“新理念”的提出,以及局地气候调节之间相互关系的理解,对于城市空间结构不同等级尺度布局以及生态服务功能响应具有重要意义,可以直接有效地应用于城市规划管理建设。

## 参考文献(References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human wellbeing: A framework for assessment [M]. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E et al. Global change and the ecology of cities [J]. Science, 2008, 319(5864): 756-760.
- [3] Alberti M. Maintaining ecological integrity and sustaining ecosystem function in urban areas [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(3): 178-184.
- [4] Kuang W H, Yang T R, Liu A L et al. An Ecocity model for regulating urban land cover structure and thermal environment: Taking Beijing as an example [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6): 1098-1109.
- [5] Cao Q, Yu D, Georgescu M et al. Impacts of future urban expansion on summer climate and heat-related human health in eastern China [J]. Environment International, 2018, 112: 134-146.
- [6] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M et al. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1002-1017.
- [7] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108 (455): 1-24.
- [8] 匡文慧, 迟文峰, 陆灯盛, 等. 城市地表热环境遥感分析与生态调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Kuang Wenhui, Chi Wenfeng, Lu Dengsheng et al. Remote sensing-based analysis of thermal environment and ecological regulations in cities. Beijing: Science China Press, 2012.]
- [9] Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X et al. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 1-11.
- [10] He C Y, Liu Z F, Tian J et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multi-scale landscape perspective [J]. Global Change Biology, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [11] Jones P, Groisman P Y, Coughlan M et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land [J]. Nature, 1990, 347(6289): 169-172.
- [12] Wu J, Jenerette G D, David J L. Linking land-use change with ecosystem processes: A hierarchical patch dynamic model [C]// Guhathakurta S. Integrated land use and environmental models. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2003: 99-119.
- [13] More T. Utopia [C]// Greene J J et al. The Essential Thomas More. Dolan J P trans. New York: New American Library, 1967.
- [14] Howard E. Tomorrow: A peaceful path to real reform. Repulsified as garden cities of in 1902 [M]. London: S Sonnenschein & Co, Ltd., 1898.
- [15] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 1: 1-8.
- [16] Pickett S T A, Cadenasso M, Grove J et al. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical and socioeconomic components of metropolitan areas [J]. Urban Ecology, 2008, 99-122.
- [17] Howard L. Climate of London deduced from meteorological observations (Vol.1) [M]. 2nd edition. London: Harvey and Dolton Press, 1833.
- [18] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.
- [19] Owen T, Carlson T, Gillies R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1663-1681.
- [20] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator [J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2): 243-258.
- [21] 匡文慧. 城市土地利用时空信息数字重建、分析与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Kuang Wenhui. Digital reconstruction, analysis and simulation of urban land use information. Beijing: Science Press, 2012.]
- [22] 方创琳, 李广东, 张蔷. 中国城市建设用地的动态变化态势与调控 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 363-376. [Fang Chuanglin, Li Guangdong, Zhang Qiang. The variation characteristics and control measures of the urban construction land in China. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 363-376.]
- [23] Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C et al. Global distribution and density of constructed impervious surfaces [J]. Sensors,

- 2007, 7(9): 1962-1979.
- [24] Lu D S, Moran E, Hetrick S. Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban-rural frontier [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing*, 2011, 66(3): 298-306.
- [25] 刘珍环, 王仰麟, 彭建. 不透水表面遥感监测及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1143-1152. [Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian. Remote sensing of impervious surface and its applications: A review. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1143-1152.]
- [26] 李德仁, 罗晖, 邵振峰. 遥感技术在不透水层提取中的应用与展望[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(5): 569-577. [Li Deren, Luo Hui, Shao Zhenfeng. Review of impervious surface mapping using remote sensing technology and its application. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 569-577.]
- [27] Ridd M K. Exploring a VIS (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [28] Kuang W H, Chi W F, Lu D S et al. A comparative analysis of megacity expansions in China and the U.S.: patterns, rates and driving forces[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 121-135.
- [29] Kuang W H, Liu Y, Dou Y Y et al. What are hot and what are not in an urban landscape: quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China[J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(2): 357-373.
- [30] 岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透水面分布估算[J]. *遥感学报*, 2007, 11(6): 914-922. [Yue Wenze, Wu Cifang. Urban impervious surface distribution estimation by spectral mixture analysis. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(6): 914-922.]
- [31] Zhang L, Weng Q H, Shao Z F. An evaluation of monthly impervious surface dynamics by fusing Landsat and MODIS time series in the Pearl River Delta, China, from 2000 to 2015 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 201: 99-114.
- [32] Christen A, Vogt R. Energy and radiation balance of a central European city[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24 (11): 1395-1421.
- [33] Grimm N B, Grove J M, Pickett S T A, et al. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems[J]. *BioScience*, 2000, 50(7): 571-584.
- [34] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 等. 城市生态系统长期研究展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 928-935. [Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, Ren Yufen et al. Perspectives in Long-term studies of urban ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 928-935.]
- [35] 刘罡, 孙鉴泞, 蒋维楣, 等. 城市大气边界层的综合观测研究——实验介绍与近地层微气象特征分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39(1): 23-32. [Liu Gang, Sun Jianning, Jiang Weinei et al. Comprehensive observation research on urban atmospheric boundary layer-Description of field experiment and analysis of micrometeorological properties in the surface layer. *The Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(1): 23-32.]
- [36] Miao S G, Dou J X, Chen F et al. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 55: 1881-1890.
- [37] 张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 等. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础[J]. *中国科学: D辑*, 2004, 34: 200-216. [Zhang Renhua, Sun Xiaomin, Wang Weimin et al. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: Physical background. *Science China: Earth Sciences*, 2004, 34: 200-216.]
- [38] Grimmond C, Blackett M, Best M et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase1[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(6): 1268-1292.
- [39] Grimmond C, Blackett M, Best M et al. Initial results from phase 2 of the international urban energy balance model comparison[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 244-272.
- [40] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M. Biocomplexity in coupled natural human systems: a multidimensional framework [J]. *Ecosystems*, 2005, 8: 225-232.
- [41] Grimm N B, Foster D, Groffman P et al. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2008, 6(5): 264-272.
- [42] Zhang C, Wu J, Grimm B N et al. A hierarchical patch mosaic ecosystem model for urban landscapes: Model development and evaluation [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 250: 81-100.
- [43] Wolf K M. Public response to the urban forest in inner-city business districts [J]. *Journal of Arboriculture*, 2003, 29(3): 117-126.
- [44] Byomkesh T, Nakagoshi N, Dewan A M. Urbanization and green space dynamics in greater Dhaka, Bangladesh[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2011, 8(1): 45-58.
- [45] Peng J, Xie P, Liu Y X et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [46] Ca V T, Asaeda T, Abu E M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park[J]. *Energy and Buildings*, 1998, 29(1): 83-92.
- [47] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120 (1): 113-130.
- [48] 应天玉, 李明泽, 范文义, 等. 基于GIS技术的城市森林与热岛效应的分析 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 63-67.



- [Ying Tianyu, Li Mingze, Fan Wenyi et al. Analysis of urban forest and heat island effect based on GIS technology. *Journal of Northeast Forestry University* 2010, 38(8): 63-67.]
- [49] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1):15-24.
- [50] City of New York. Million Trees NYC [EB/OL]. <https://www.milliontreesnyc.org/>. [2011-06-11].
- [51] City of Los Angeles[EB/OL].<https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=16452590?storyId=16452590>. [2015-06-11].
- [52] City of Pasadena. Pasadena Tree Protection Ordinance [EB/OL]. 2011. <http://ww2.cityofpasadena.net/publicworks/PNR/TreeOrdinance/default.asp>. [2015-06-11].
- [53] City of Seattle. Seattle's Canopy Cover [EB/OL]. 2011.<http://www.seattle.gov/trees/canopycover.Html>. [2001-06-11].
- [54] Andresen J W. Selection of trees for endurance of high temperatures and artificial lights in urban areas. *Publications-USDA*[J]. Forest Service, 1976, 22: 67-75.
- [55] Carroll R E. Changes affecting the employment cost index: An overview[J]. *Monthly Labor Review*, 2006, 129(4): 3-5.
- [56] 贾刘强, 舒波. 城市绿地与热岛效应关系研究回顾与展望 [J]. *中国园林*, 2012, 28(4): 37-40. [Jia Liuqiang, Shu Bo. Review and prospect of the relationship between urban green space and heat island effect. *Chinese Landscape Architecture*, 2012, 28(4): 37-40.]
- [57] Cao X, Onishi A, Chen J et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 224-231.
- [58] Zhang Y, Odeh I, Han C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2009, 11: 256-264.
- [59] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504-513.
- [60] Georgescu M, Moustauoui M, Mahalov A, et al. An alternative explanation of the semiarid urban area "oasis effect" [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D24113): 1-13.
- [61] Lazzarini M, Molini A, Marpu P R et al. Urban climate modifications in hot desert cities: The role of land cover, local climate, and seasonality[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22):9980-9989.
- [62] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展 [J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4553-4565. [Chen Ailian, Sun Ranhao, Chen Liding. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4553-4565.]
- [63] 魏建兵, 肖笃宁, 解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 36-45. [Wei Jianbing, Xiao Duning, Xie Fujun. Evaluation and regulation principles for the effects of human activities on ecology and environment. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 36-45.]
- [64] Peng J, Tian L, Liu Y X et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [65] Thomas D. London's green belt: The evolution of an idea[J]. *The Geographical Journal*, 1963, 129(1): 14-24.
- [66] Nelson A C, Moore T. Assessing urban growth management: The case of Portland, Oregon, the USA's largest urban growth boundary[J]. *Land Use Policy*, 1993, 10(4): 293-302.
- [67] Kühn M. Greenbelt and green heart: Separating and integrating landscapes in European city regions[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(1-2): 19-27.
- [68] Jongman R H G, Bouwma I M, Griffioen A et al. The pan European ecological network: PEEN[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3): 311-326.
- [69] Hong W, Yang C, Chen L et al. Ecological control line: A decade of exploration and an innovative path of ecological land management for megacities in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191: 116-125.
- [70] 李卫锋, 王仰麟, 蒋依依, 等. 城市地域生态调控的空间途径——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1823-1831. [Li Weifeng, Wang Yanglin, Jiang Yiyi et al. Spatial approaches to ecological regulation in urban areas: A case in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1823-1831.]
- [71] Kuang W H, Yang T R, Yan F Q. Examining urban land-cover characteristics and ecological regulation during the construction of Xiong'an New District, Hebei Province, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1): 109-123.
- [72] 李杨帆, 林静玉, 孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 485-494. [Li Yangfan, Lin Jingyu, Sun Xiang. An early warning method on ecological risk and its application to improve landscape ecological security pattern regulation. *Geographical Research*, 2017, 36(3): 485-494.]
- [73] Jones B, O'Neill B C, McDaniel L et al. Future population exposure to US heat extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 652-655.
- [74] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, 525(7569): 367-371.
- [75] Sun Y, Zhang X, Zwiers F W et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1082-1085.
- [76] Zhao L, Lee X, Smith R B et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [77] Martin-Mikle C J, Beurs K M D, Julian J P et al. Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 29-41.

- [78] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [79] Gaffin S R, Rosenzweig R C, Kong A Y. Adapting to climate change through urban green infrastructure[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 704-704.
- [80] Jones H P, Hole D G, Zavaleta E S. Harnessing nature to help people adapt to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 504-509.
- [81] Kuang W H, Chen L J, Liu J Y et al. Remote sensing-based artificial surface cover classification in Asia and spatial pattern analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1720-1737.
- [82] Kuang W H, Liu J Y, Dong J W et al. The rapid and massive urban and industrial land expansions in China between 1990 and 2010: A CLUD-based analysis of their trajectories, patterns and drivers[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 145: 21-33.

## Advance and Future Prospects of Urban Land Use/Cover Change and Ecological Regulation of Thermal Environment

Kuang Wenhui

(Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Urban land use/cover change (LUCC) and ecological regulation on thermal environment are hot topics of urban ecology and climate adaptation. This study proposed the significances in linking urban LUCC/spatial structure with the thermal regulation of ecological services. In this paper, the research progress of urban LUCC, the role of urban green infrastructure in heat island mitigation and climate adaptability, the integration of observational experiments, quantitative remote sensing, quantitative modeling of process models, and ecological regulation of thermal environment are reviewed. On this basis, a remotely sensed detection methods on urban structure components with high-precision at local or regional scales was proposed. We advanced synchronically implement field observation with satellite transits (e.g., Landsat 8, MODIS) and remotely sensed retrieval of micro-climate, eddy covariance, land surface temperature and other parameters along an urban-rural gradient in metropolitan area. The integration of these parameters into EcoCity V1.0 will be used to examine the mechanisms of the impacts of impervious surface area and green space components, their radiation and surface heat fluxes, and anthropic heat sources on urban thermal environment, and to analyze the spatio-temporal heterogeneity of urban heat island effect induced by urban expansion of different city sizes and configuration. The impacts of urban high-precision underlying surface with multi-scale (functional zones/land-cover components/configuration and material, etc.) on local air temperature, and radiation and energy budget, the regulating threshold of urban surface structure components for alleviating urban heat island, and the quantitative knowledge of influence of urban LUCC on biogeophysical mechanisms at regional and global scales will be the important prospective contents in the future. So, the effective linking between spatial planning with urban ecology and urban climate will be of significance in this field. The overarching objectives of this study are to identify the ecological threshold on regulating urban underlying impervious surface area and green space component for alleviating extreme weather heat and improving human comfortability aiming to UN Sustainable Development Goals 2030. This research will promote our understanding of the urban biophysical mechanisms of the urban thermal environment and provide the scientific fundamentals in building livable urban environment and urban ecology security.

**Key words:** urban land use/cover change; heat island; regulation of thermal environment; climate adaptability; impervious surface; quantitative remote sensing