城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)研究——以北京城市为例

匡文慧^{1*}, 杨天荣^{1,2}, 刘爱琳^{1,2}, 张弛³, 陆灯盛^{4,5}, 迟文峰⁶

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

4. 浙江农林大学, 杭州 311300;

5. Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA;

6. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018

* E-mail: kuangwh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2016-11-16; 接受日期: 2017-03-20; 网络版发表日期: 2017-04-06

国家自然科学基金重大项目(批准号: 41590842)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 41371408)资助

摘要 城市土地利用/覆盖变化及其生态环境效应是当前城镇化研究的热点问题,但是由于城市内部空间结构异质性刻画不足,以及与城市地表热环境之间定量关系认识不足,严重制约其在城市生态规划管理方面的应用能力.本研究耦合城市地理学“空间结构理论”和城市气候学“地表能量平衡原理”,提出了城市地表结构与热环境调控新的理念,揭示了城市空间结构与地表热环境之间的互馈机制;并自主研发了地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity),确定了城市地表热环境生态调控阈值.基于实验观测、遥感反演和气象资料等数据,揭示了城市内部生活空间、生产空间、服务空间和生态空间分布格局以及相应的城市不透水地表、绿地和水域等地表覆盖组分布局模式对城市热岛形成的地表辐射与热通量影响程度.结论表明,不同城市功能区之间热环境的差异与其地表覆盖组分关系密切,商业、住宅等高密度城市不透水地表区,会显著增加显热通量起到升温作用,而绿地、水域等生态功能区会显著增加潜热通量起到降温作用.我们也发现,不同功能区由于其绿地组分比例差异导致植被热耗散作用不同,而且存在一定的生态阈值,对于商业、交通道路和住宅等高密度城市不透水地表功能区,其城市绿化工程对于提升植被潜热耗散效率更加有效,导致单位植被盖度的降温效果更为显著.同时也表明,EcoCity模型为城市地表结构特征和地表热通量之间耦合作用机制的理解和时空特征分析提供了有效的支撑,而且对于特定规模城市热岛缓减以及不同功能区绿化控制指标和阈值的界定,提供了普适性通用的计算模型系统,从而科学有效的服务于城市生态规划与管理.

关键词 城市土地利用,城市不透水地表,北京,地表热环境,遥感,生态调控

中文引用格式: 匡文慧, 杨天荣, 刘爱琳, 张弛, 陆灯盛, 迟文峰. 2017. 城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)研究——以北京城市为例. 中国科学: 地球科学, 47: 847–859, doi: [10.1360/N072016-00273](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N072016-00273)
英文引用格式: Kuang W H, Yang T R, Liu A L, Zhang C, Lu D S, Chi W F. 2017. An EcoCity model for regulating urban land cover structure and thermal environment: Taking Beijing as an example. Science China Earth Sciences, 60: 1098–1109, doi: [10.1007/s11430-016-9032-9](https://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11430-016-9032-9)

1 引言

土地利用/覆盖变化作为生态系统服务变化的重要驱动力,直接影响人居环境质量和人类安康(Millennium Ecosystem Assessment, 2003). 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)的背景下,城市生态系统服务正面临着前所未有的挑战(McGranahan等, 2007; Grimm等, 2008; Grimmond等, 2010; Alberti, 2010; Seto等, 2012; 匡文慧, 2015). 21世纪以来,中国城市以每年1788km²的速度对外扩张,其中以高密度城市不透水地表扩张为主,城市扩张速度是20世纪90年代的2.16倍(Liu等, 2010; Kuang等, 2013). 如何统筹规划现有和未来城市发展用地,实现城市内部生活、生产、服务与生态空间结构的优化布局,事关国家整体城镇化发展的质量. 因此,在现代城市发展中,商业和工业用地、居住用地及生态用地等如何有机重组,城市建筑红线(城市不透水地表面积比例)与生态绿线(绿地面积比例)、蓝线(水域面积比例)等如何定量调控,以促进有限的城市空间调节局地气候、改善人居环境、减缓城市污染,进而营造良好的城市生态环境,仍有待于城市规划科学、城市生态学、城市气候学等自然和社会科学链接协同解答(Anderson, 1976; Pickett等, 2001; Mooney等, 2013; 李强和顾朝林, 2015).

城市土地利用/覆盖变化通过改变城市不透水地表、绿地等城市下垫面主要类型及其面积比例,引起地表反照率、比辐射率和地表粗糙度等参数的变化,从而对区域辐射能量平衡产生影响. 其中,城市不透水地表的增长会增强地表显热通量,绿地空间的增长会增加潜热通量,从而加剧或减缓城市热岛,由此对城市生态系统服务产生深刻影响(周淑贞和张超, 1985; Jones等, 1990; Oke等, 1989; Oke, 2006; Pielke等, 2007; Heisler和Brazel, 2010; Goldbach和Kuttler, 2013). Oke(1984)曾提出在城市冠层垂直交互的动量通量、热量通量和湿度与乡村不同,且局地气候调节效应取决于宏观、中观和微观三个尺度基本特征,因此城市复杂下垫面类型相应可划分城市结构、城市覆盖、城市构造和城市代谢等四类,而这四种类型的聚合形成理解局地气候特征的城市地表物理属性特征. 其中,城市结构指建筑空间维度、街道宽度等;城市覆盖包括城市不透水地表、绿地、裸土和水域;城市构造指

建筑材料等;城市代谢则包括人为产生的水、热和污染物等.

在城市内部结构及不同覆盖组分遥感分类方法方面, Ridd(1995)构建了基于遥感信息的V-I-S(vegetation-impervious surface-soil)概念模型,将城市土地覆盖分为绿地植被、城市不透水地表与裸土,该模型的建立对于解决混合像元问题、提高城市不透水地表信息提取精度具有重要意义. Wu等(2003)应用LSMA(linear spectral mixture analysis)模型并结合V-I-S模型,将城市土地覆盖的混合像元分解为城市不透水地表(高反照率地表、低反照率地表)、植被和裸土3种类型,获取了美国哥伦布(Columbus)地区亚像元城市不透水地表信息. Hu和Weng(2011)提出基于对象的模糊分类方法,基于IKONOS影像提取了美国印第安纳波利斯(Indianapolis)居民区及中心商业区的城市不透水地表信息,居民地和中心商业区信息提取精度分别达到95%和92%.

当前发展的城市生态系统服务评价相关模型,包括HPM-UEM、InVEST、CITYgreen、i-Tree Eco和UFORE等,已在局地或区域城市生态系统服务影响评价中发挥了重要作用. 而在中尺度区域上,还包括耦合了陆表模型或城市冠层模型的MM5、RAMS和WRF等. 在全球范围内,开展城市能量平衡研究涉及到的模型有LUMPS、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)和TEB(town energy balance)等(Grimmond等, 2010),这些模型中既包括了单层的模型,又包括了多层模型;既有中尺度的模块,又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.

然而当前国内外研究仍缺乏对城市内部功能结构组合(特别是城市土地利用功能区以及相应地表覆盖特征)与生态系统服务(热调节功能为其核心功能)之间的紧密结合和统筹考虑(Wu, 1999; Wu等, 2003; Mooney等, 2013). 由于表征城市内部结构和热环境等指标精细化空间信息获取具有一定难度,支持城市内部功能区和覆盖特征以及生态系统服务影响评估的数据资料不足,导致城市地表覆盖结构与城市生态系统服务,特别是与热调节服务之间的定量关系认识不

足,严重制约着其在城市规划及景观设计方面的应用能力.

21世纪以来,快速城镇化和工业化进程造成中国城市生态环境问题日趋严峻,随着《国家新型城镇化规划(2014~2020年)》战略的实施,如何提升城市生态环境管控能力,改善人居环境,提高新型城镇化质量成为当今重要的科研和实践命题.但是,当前中国的城市总体规划、城市控制性及修建性详细规划的编制,仍然缺乏对城市热岛控制方面的统筹考虑.本研究在遥感地面同步观测实验、遥感定量反演与验证、模型系统参数化的基础上,发展了城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity),定量刻画了城市内部功能区以及相应的覆盖特征与地表热环境之间相互关系,界定了城市不同功能区城市不透水地表比率调控阈值.本研究具有如下科学意义:(1)提高城市土地功能区和覆盖组合结构与地表辐射能量平衡互馈关系内在机理的认知能力,加深城市化与全球环境变化生物地球物理机制重要科学原理的认识;(2)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的影响程度;(3)实现城市地表热环境研究从“科学量测”向“科学调控”方向发展,可为优化城市生产、生活、服务和生态空间结构,控制城市发展规模及城市生态规划与整治等提供科学参考.

2 EcoCity模型与方法

2.1 模型结构与功能模块

城市土地利用/覆盖变化具有高度动态、结构复杂和类型镶嵌等特征,城市覆盖结构组分与热环境调控模型发展需要多尺度高精度空间信息的支持.基于上述问题考虑,亟需发展具有空间针对性并面向城市规划应用的高精度高时空分辨率模型系统,使城市内部功能结构组合与生态系统服务热调节功能之间能够紧密结合. EcoCity模型的发展以城市地理学、城市气候学和城市生态学等多学科理论方法为基础,高度耦合城市地理学“空间区位理论”、城市气候学“辐射能量平衡”理论和参数化方案,实现城市规划和地表覆盖结构组分与热环境调控管理应用服务. EcoCity模型主要功能包括对城市功能区与地表覆盖等下垫面精细化分类时空信息的精准探测,如基于 Landsat TM、

SPOT和航空影像等高分辨率影像识别城乡界线、城市功能区及城市不透水地表和绿地组分类型,典型城市30m分辨率像元城市不透水地表和绿地组分比例的混合像元分解,区域尺度(中国、亚洲与全球)250m分辨率城市不透水地表组分信息快速获取等(Kuang等, 2013, 2014; 匡文慧等, 2016);模拟不同情景下城市未来扩张过程,并预测未来城市扩张过程中城市不透水地表和绿地相应的控制比例以及产生的热岛效应;基于 Landsat TM、MODIS遥感影像定量反演地表温度、地表辐射和热通量特征等(Kuang等, 2015).基于上述模型反演与模拟结果,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,可对未来城市扩张过程中不同功能区城市热岛缓解提供理论基础.

EcoCity模型共包含五大功能模块(图1).其中:(1)土地覆盖遥感监测模块,实现遥感影像校正、图像增强等预处理功能,其核心在于对城市地表覆盖组分比例信息的提取,即通过“线性光谱混合像元分解模型”提取地表高反照率、低反照率、植被及土壤等4类光谱端元的线性组合,将城市土地覆盖类型划分为城市不透水地表、水域等类型;(2)城市地表结构分析模块,实现对城市不同功能区不透水地表、绿地等面积及比例的统计分析;(3)地表通量遥感反演模块,基于遥感地面同步观测数据定量反演城市大气短波辐射、长波辐射和地表显热、潜热通量及地表温度等高精度时空信息,并进行参数校正实现参数本地化,从而获取城市地表温度及辐射通量各项指标;(4)城市扩张未来情景模拟模块,在不同情景的设定下,模拟未来城市扩张趋势,预测未来城市扩张范围及空间扩张强度;(5)城市生态调控与规划应用模块,预估不同城市规模城市地表不透水和绿地热环境调控生态系统服务阈值,识别城市绿化生态工程重点区域,服务于城市规划管理.

2.2 模型参数化方案与参数输入输出

EcoCity模型中采用城市建成区、城市功能区以及相应的地表覆盖状态等三级分类指标.作为模型的输入数据,城市建成区和功能区分类数据主要采用人机交互数字化分类获取,城市不透水地表和绿地组分比例信息则采用高分辨率遥感图像线性光谱混合像元分解方法提取.

图1 EcoCity模型框架结构

土地覆盖遥感监测模块输入数据包括Landsat TM遥感影像、遥感解译标志和研究区范围等。其中，对遥感影像采用主成分分析法提取主要波段，并基于线性光谱混合像元分解模型获取土壤、植被、高反照率和低反照率端元信息，将水体、建筑阴影等信息掩码剔除后，以高反照率与低反照率覆盖度之和作为城市不透水地表信息(Kuang等, 2014)，计算公式为

$$R_{(imp,b)} = f_{low} \cdot R_{(low,b)} + f_{high} \cdot R_{(high,b)} + e_b \quad (1)$$

式中， $R_{(imp,b)}$ 为遥感反演的端元城市不透水地表组分比例； $R_{(low,b)}$ 和 $R_{(high,b)}$ 分别为遥感反演的四个端元中低反照率和高反照率覆盖比例； f_{high} 和 f_{low} 表示高、低反照率端元所占的比例， e_b 为模型的残差。进而输出城市不透水地表、绿地以及其他用地信息。

城市地表结构分析模块中输入城市边界、城市功能区以及城市不透水地表等信息，在城市边界控制下城市功能区与城市不透水地表数据叠置分析，计算不同功能区城市不透水地表、绿地面积及比例。

地表通量遥感反演模块中利用Landsat TM、MODIS、气象观测数据、土地利用/覆盖以及通量观测数据，基于Landsat TM单窗算法计算地表温度，其中亮温计算公式为

$$T_6 = K_2 / \ln(1 + K_1 / L_6), \quad (2)$$

式中， T_6 为Landsat TM数据第6波段的亮度温度， K_1 、 K_2 为常量系数； L_6 为热辐射亮度值。

地表辐射能量平衡方程为

$$R_n = R_{sd} - R_{su} + R_{ld} - R_{lu}, \quad (3)$$

$$R_n + R^* = H + LE + G, \quad (4)$$

式中， R_{sd} 、 R_{su} 分别为向下和向上短波辐射； R_{ld} 、 R_{lu} 分别为向下和向上长波辐射。 R_n 为地表净辐射， H 为显热通量， LE 为潜热通量， G 为土壤热通量， R^* 为人为热源。

利用张仁华等(2004)研发的PCACA模型，通过准确的有无植被的干点、湿点对地表温度和植被进行梯形算法定位和热通量分割，得到显热通量和潜热通量，进而得到研究区的波文比。

$$\beta = H / LE, \quad (5)$$

式中， β 为波文比， H 为显热通量， LE 为潜热通量(Kuang等, 2015)。

城市扩张未来情景模拟模块基于空间分析与人工神经网络(ANN)相结合的模型，充分考虑交通道路距离、城市中心距离、地形和高程、河流域以及城市规划等影响要素，构建城市扩张与不同区位影响

因子空间相互关系, 预测城市扩张的空间分布及城市不透水地表、绿地面积比例, 具体公式如下:

$$U_{x,y} = f(S_{x,y}, N_{x,y}, E_{x,y}, L_{x,y}, P_{x,y}), \quad (6)$$

式中, $U_{x,y}$ 表示城市在 t 时段的增长过程; $S_{x,y}$ 表示土地用途以及自身的邻域状态; $N_{x,y}$ 表示自然影响因素, 包括地形因子、水域控制等; $E_{x,y}$ 表示社会经济因子, 主要包括GDP、国外投资和产业结构等因子对城市增长产生的影响; $L_{x,y}$ 表示城市交通道路、环城公路和铁路等区位因素对城市空间增长的牵引作用; $P_{x,y}$ 主要指区域发展战略与土地利用政策对城市增长的影响(Kuang, 2011).

最终, 利用地表潜热通量与植被覆盖度参数获取单位盖度潜热比, 评估城市绿化工程的“非常有效、有效和低效”的调控阈值, 即可得到城市绿化工程对地表热环境调控的有效性等级程度(图2).

2.3 模型输出数据精度评价

应用Google Earth高分辨率图像、野外调查数据和航空影像资料, 采用分类平均正确率指标来评价城

市建成区、功能区和城市不透水地表、绿地等地表覆盖的分类精度, 采用平均相对误差指标对城市不透水地表、绿地等地表覆盖组分比例分类精度进行评价, 样本数量、评价方法详细内容参见作者前期出版文献(匡文慧等, 2010; Kuang等, 2014).

地表热通量反演的各参数验证采用涡度相关站点数据应用均方根误差进行验证. 计算均方根误差的公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q - Obs)^2}{N}}, \quad (7)$$

式中, Q 为遥感反演的参数值, Obs 为地面观测的参数值, N 为验证点总数. RMSE的值越小, 表示遥感反演的值越精确(匡文慧, 2015).

3 案例选择与数据源

3.1 区域概况

北京是中国的首都, 位于 $39^{\circ}38' \sim 40^{\circ}51'N$, $115^{\circ}25' \sim 117^{\circ}30'E$, 地处华北平原的北部. 全市土地总

图 2 EcoCity模块输入与输出框架

面积 $1.64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 西部和西北部为山地, 面积占62%, 其他地区以平原为主。市区总面积 1368.32 km^2 , 2015年初常住人口2152.0万人。气候类型属于暖温带大陆性季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 年平均气温 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 。自20世纪80年代以来, 城市结构由紧凑形态不断向蔓延形态发展, 导致城市建成区和城市不透水地表面积快速增长, 2015年建成区面积 1268 km^2 , 城市不透水地表面积比例72.6%。近30年来城市内部固有结构发生巨大转变, 突出表现为住宅区和公共服务用地大面积增加, 高污染工业企业外迁, 绿地面积大幅度增加。北京作为京津冀城市群的首位城市, 在京津冀协同发展中正以疏解非首都核心功能、解决北京“大城市病”为基本出发点, 调整优化城市布局 and 空间结构, 提升首都人居环境质量水平, 作为本研究选择案例具有重要的典型意义。

3.2 数据

采用1984年8月16日10点23分、1994年9月13日10点10分、2004年9月8日10点37分、2014年9月4日10点53分和2009年9月22日10时43分卫星过境的Landsat 5 TM影像, 影像行列号为123行32列。多光谱波段空间分辨率为30m, 热红外波段空间分辨率为120m。同时利用NASA提供的TERRA/MODIS遥感影像(即MOD021KM、MOD03数据), 多光谱空间分辨率为250m, 热红外波段空间分辨率为1km。北京市气象数据采用北京市气象站点实时观测数据, 包括气温、水汽压、湿度和风速等观测数据。实测数据包括利用自动气象站、辐射四分量和涡度相关仪等获取城市地表辐射四分量和潜热、显热通量等数据。

4 结果与分析

4.1 数据精度评价

基于统一的空间坐标系统, 北京市总体规划之市域规划图(2004~2010年)和土地利用规划图件(2006~2020年), 并参考2009年资源3号遥感影像, 对城市建成区范围内功能区进行划分, 通过航空像片和实地采样调查进行精度检验, 各功能区划分精度均达到分类精度要求。其中, 平均分类精度达94.75%。城市土地覆盖分类正确率综合精度为94%, 城市不透水地表信息每个像元组分比例提取的平均相对误差为0.64%(Kuang等,

2014)。

基于Landsat 5 TM影像数据, 应用定量遥感反演模型获取了下行短波辐射、上行短波辐射、上行长波辐射、下行长波辐射和地表净辐射通量, 应用8个实时地面观测站点数据进行验证分析, 结果显示一致性较好, 进一步分析得到, 地表下行和上行短波辐射的均方根误差分别为 20.02 和 10.20 W m^{-2} , 地表下行和上行长波辐射的均方根误差分别为 12.68 和 6.47 W m^{-2} , 地表净辐射通量的均方根误差为 20.72 W m^{-2} 。遥感反演值与地表同步的观测值验证结果较好。

4.2 不同功能区城市不透水地表与绿地组分特征分析

将北京城市功能区分类图和城市不透水地表和绿地组分进行空间叠置分析(图3; 表1), 在城市建成区内, 城市不透水地表总面积为 578.23 km^2 , 占其面积比例的67.18%, 而绿地总面积为 177.48 km^2 , 占研究区总面积的20.62%。在住宅区、商业区、交通道路区和公共服务区内, 由于建筑高度密集, 城市不透水地表所占其功能区面积比例均超过80%。其中各功能区内城市不透水地表分布面积最大的是在住宅区, 面积约 387.09 km^2 。工业仓储区城市不透水地表面积比例不到50%, 这与工业区通常位于边缘区, 用地厂房和道路等建设用地面积比例相对较小有关。

4.3 城市地表热环境时空格局以及演化特征分析

通过分析研究区1984~2014年卫星过境时刻地表温度分布状况(图4), 发现研究区最低地表温度和最高地表温度以及平均地表温度随着时间的推移显著升高。从1984~2014年平均地表温度升高 5.17 K 。从地表温度分布格局看, 呈现城市热岛空间范围和城市热岛的强度呈现显著增加的趋势, 1984年地表温度高温区主要集中于西城和东城区, 到1994年地表温度高温区不断向海淀、朝阳和丰台区扩展, 总体上城市热岛空间范围和城市热岛的强度增加的速率相对较慢。但是, 到2004年和2014年城市热岛空间范围和城市热岛的强度显著增强, 特别是在海淀、朝阳、丰台区和石景山区等周边地区地表温度高温区城市热岛空间范围和城市热岛的强度增加的速率相对更快。这一城市地表热环境的演化特征与研究区内城市不透水地表快速增长密切相关。

图 3 研究区内土地利用现状、各功能区分布以及覆盖组分比例

(a) 北京市土地利用现状; (b) 北京市建成区城市不透水地表组分比例; (c) 北京市建成区功能区分类; (d) 不同功能区城市不透水地表和绿地面积比例

表 1 不同功能区城市不透水地表、绿地分布面积及比例统计表

功能分区	占地面积(km ²)		功能区总面积 (km ²)	占功能区面积比例	
	绿地	城市不透水地表		绿地	城市不透水地表
住宅区	37.97	387.09	482.88	7.86%	80.16%
商业区	1.16	9.34	11.50	10.09%	81.22%
工业仓储区	15.95	21.82	46.63	34.21%	46.79%
公共服务区	9.34	72.42	88.30	10.58%	82.02%
交通道路区	2.92	28.45	33.53	8.71%	84.85%
绿地	103.18	54.88	181.10	56.97%	30.30%
水域	4.20	2.45	12.16	34.54%	20.15%
其他	2.75	1.79	4.67	54.89%	38.33%
总计	177.48	578.23	860.78	20.62%	67.18%

图4 研究区地表温度空间分布图

(a) 1984年8月16日; (b) 1994年9月13日; (c) 2004年9月8日; (d) 2014年9月4日

4.4 城市地表特征对热环境影响机制分析

以2009年9月22日Landsat TM影像获取的数据为例,分析其地表热环境影响机制,我们发现不仅城市各功能区内地表温度差异显著,特别是城市不透水地表和绿地之间差异非常显著,而且观测的不同建筑材

质之间地表温度也有一定的差异(图5a和e)。其中,住宅区地表温度平均值为38.37℃,比水域地表温度平均值高7.53℃,比绿地的地表温度平均高3.26℃。这主要与住宅区内建筑、道路和广场由大规模的砖瓦、水泥、混凝土和沥青组成,导致城市不透水地表比例较

图 5 研究区地表温度和地表热通量空间分布和统计图

(a) 地表温度; (b) 波文比; (c) 显热通量; (d) 潜热通量; (e) 不同功能区地表温度统计值; (f) 不同功能区波文比统计值; (g) 不同功能区显热通量统计值; (h) 不同功能区潜热通量统计值

高有关。

由图5b~d和f~h发现, 城市地表显热、潜热和波文比具有高度的异质性。在建成区高密度城市不透水地表分布区内显示出较高的地表显热通量。在各功能区内, 交通道路区、住宅区以及公共服务区内显热通量相对较大, 分别为220.56、219.34和219.52 W m⁻², 而水域、植被分布比例较高的区显热通量相对较低。而潜热通量的分布恰恰相反, 城市建成区高密度城市不透水地表分布区是潜热通量的低值区, 而其周围植被茂密的郊区以及水域则是潜热通量的高值区, 其中, 水域的潜热通量达到202.54 W m⁻²。

通过以上分析结合2009年9月20日遥感卫星过境和白天2个时段3个观测站点获取的有效观测值, 比较分析不同下垫面用地类型地表热量收支差异状况, 结果表明城市不同功能区之间地表温度差异, 与其城市不透水地表和绿地组分差异有关, 进而对辐射能量收支产生影响。从地表辐射方面分析, 在夏秋季节, 地表反照率由高到低依次为城市不透水地表>城市绿地>城郊植被, 其中城市建筑屋顶的地表反照率最大, 而净辐射通量值最小, 城市绿地和城郊农田与之相反。城市不透水地表、绿地到城郊植被显热通量所占净辐射的比例依次降低, 潜热通量所占净辐射的比例依次升高。城市建筑水泥下垫面显热通量白天所占的比例高达0.63, 高于城市绿地, 而其潜热通量的比例仅为0.19, 城市不透水地表下垫面的热量支出以显热通量为主, 其波文比高达4.03。城市绿地潜热通量大于显热通量所占的比例, 其中潜热通量比例为0.58, 而显热通量比例为0.32, 由于城市绿地的植被蒸散发作用, 使得潜热通量占主导。

因此, 不同城市功能区之间热环境的差异主要与其覆盖组分关系密切, 商业和住宅等高密度城市不透水地表区, 会增加显热通量起到升温作用, 而绿地和水域等生态功能区会增加潜热通量起到降温作用。由此, 城市建设规划不同功能分区由于其下垫面城市不透水地表和绿地分布组分比例的不同, 进而影响其地表辐射能量平衡等因素, 从而导致其地表热环境呈现显著差异, 会产生不同的城市热岛效应。

4.5 城市不透水地表和绿地组分生态调控阈值分析

绿地植被树木或草坪以潜热的方式发生蒸腾作

用, 对城市会起到降温作用, 从而提升城市生态系统热调节服务能力。研究表明, 植被冠层的热耗散强度(LE/VFC), 潜热(LE)与植被覆盖度(VFC)之比, 随着地表植被覆盖度的下降, 热耗散强度呈指数增加趋势(Kuang等, 2015)。进而通过城市植被覆盖和植被的热耗散强度之间拟合, 呈指数拟合关系($P<0.01$; $Adj-R^2=0.64$), 公式如下:

$$LE/VFC = 319.78 + 1484.99 \times e^{-5.86 \times VFC} \quad (8)$$

为进一步探究城市内部各功能区不同地表覆盖组分对热环境调节作用, 我们采用上述方法计算出不同功能区的植被热调节强度占各功能区面积比例。结果表明, 城市绿化工程在建成区内各功能区热调节效果差异显著(图6a), 绿化工程“非常有效”区, 依次以中心城区商业区、交通道路区和住宅功能区面积比例相对更高。其中, 商业区绿化工程“非常有效”区面积为3.8 km², 占商业区总面积的33.26%, 住宅绿化工程“非常有效”区占住宅区总面积的26.42%, 其面积在各功能区中最大, 为126.01 km², 住宅区绿化工程“有效”区占各功能区面积比例最高。对于公园绿地、城市边缘工业仓储和其他功能区绿化工程主要以低效面积比例为主。

统计主城区内不同行政区绿化工程热调节效应面积比例结果表明, 城市绿化工程热调节效应存在明显的梯度差异(图6b)。城市绿化工程热调节功能“非常有效”区域占各行政区划面积的比重依次为西城、东城、朝阳、丰台、石景山和海淀。城市绿化工程热调节功能“有效”区占各行政区划面积的比重总体上与各行政区划“非常有效”区趋势基本相同。

5 讨论与结论

本研究耦合城市地理学“空间结构理论”和城市气候学“地表能量平衡原理”, 提出了城市地表结构与热环境生态调控新理念, 自主研发了以城市地表覆盖结构组分与热环境调控为主导的模拟模型(EcoCity), 揭示了城市空间结构与地表热环境之间的互馈机制。通过对系统功能模块、参数化方案的设计及参数校正、模型模拟和验证, 发展了EcoCity模型系统, 集成土地覆盖遥感监测、城市地表结构分析、地表通量遥感反演、城市扩张未来情景模拟和城市生态调控与规划应用等五个模块。通过对模型模拟和遥感反演

图6 绿化工程对地表热环境生态调控有效性等级面积比例

(a) 不同功能区; (b) 不同行政区

结果的精度评价, 对不同功能区城市不透水地表和绿地组分比例, 城市地表热环境时空格局以及演化特征分析, 城市不同地表下垫面对热通量影响机制以及城市不透水地表和绿地组分生态调控阈值进行分析. 具体结论包括:

(1) 经过实地验证, 采用EcoCity模型得到的城市功能区平均分类精度为90.79%, 获取的城市不透水地表和绿地组分的用户精度和生产者精度分别为88.56%和87.58%, 反演的地表辐射各分量均方根误差在 20W m^{-2} 以上. 综上, EcoCity模型可实现对城市内部结构的精细化探测.

(2) 不同城市功能区之间热环境的差异与其覆盖组分关系较为密切. 其中, 住宅区和交通道路区城市不透水地表比例分别达80.16%和84.85%, 为高密度城市不透水地表区, 故会增加显热通量, 从而使波文比相对较高, 起到升温作用; 而绿地、水域等生态功能区会增加潜热通量使波文比相对较低, 起到降温作用. 上述这种能量收支的差异归根结底仍是由于城市不同结构组成的下垫面差异所致.

(3) 通过分析各功能区不透水地表和绿地的生态阈值发现, 城市绿地比例在各功能区内的差异导致热调节作用不同. 由于商业区、交通道路区和住宅区植被覆盖度较低, 绿化工程对于缓解热岛效应“非常有效”, 且其面积比例由高到低依次为中心城市商业区、交通道路区和住宅区; 对于公园绿地、城市边缘工业仓储区的绿化工程, 则主要以“低效”面积比例为

主. 北京主城区的南部, 绿地面积比例较少, 导致其地表温度在北京主城区内的行政区中最高, 在城市旧城改造过程中, 应充分考虑增加绿地面积比例, 以减缓城市热岛效应.

城乡边界及其内部景观结构具有高度的动态性、结构复杂性和类型镶嵌等特征, 故高精度城市内部下垫面组分信息获取不论在城镇化、城市生态领域, 还是在城市规划应用领域均面临着重大挑战. 本研究应用地理信息空间分析技术, 巧妙地将城市规划中的功能区和城市不透水地表、绿地覆盖信息建立空间关联性, 进而计算具体每个城市功能区乃至每个小区、楼盘的硬化地表面积比率. 这一思路和方法为城市总体规划、城市控制性及修建性详细规划的编制提供了精准信息数据和全新思维模式, 其中, 城市不透水地表等内部结构的高精度遥感分类对于海绵城市建设规划具有更实际更直接的应用价值.

在EcoCity模型支持下, 已发展了城市功能区布局以及城市不透水地表、绿地30m甚至亚米级像元组分比例信息高精度制图关键技术, 可提供高精度的城市功能区布局以及城市不透水地表、绿地等建设规划布局详细制图信息, 有效识别出城市极端高温区域, 并对城市绿化工程建设减缓城市热岛更有效的重点区位进行制图分析, 在城市建设规划新区开发和旧城区改造中具有非常重要的应用价值.

此外, EcoCity模型相关功能模块及产生的高精度数据和制图产品, 已在环境保护、城市规划和地震灾

害等研究领域深入应用,并将在北京城市气象部门预测预报和洪涝灾害预警方面得到进一步推广应用。但与此同时,仍需对EcoCity模型在局地气候、城市生态系统服务等方面进行拓展与完善,特别是在局地气候效应方面,应结合观测实验和雷达遥感构筑三维立体结构,以期更加深入模拟分析大气边界层垂直高度的影响。

参考文献

- 匡文慧, 陈利军, 刘纪远, Xiang W N, 迟文峰, Lu D S, 杨天荣, 潘涛, 刘爱琳. 2016. 亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析. *中国科学: 地球科学*, 46: 1162–1179
- 匡文慧, 张树文, 刘纪远, 邵全琴. 2010. 城市用地空间信息分类与数字重建: 以长春百年城市内部用地变化为例. *遥感学报*, 14: 345–355
- 匡文慧. 2015. 城市地表热环境遥感分析与生态调控. 北京: 科学出版社. 109
- 李强, 顾朝林. 2015. 城市公共安全应急响应动态地理模拟研究. *中国科学: 地球科学*, 45: 290–304
- 张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 许金萍, 朱治林, 田静. 2004. 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. *中国科学: 地球科学*, 34(增刊2): 200–216
- 周淑贞, 张超. 1985. 城市气候学导论. 上海: 华东师大出版社. 315
- Alberti M. 2010. Maintaining ecological integrity and sustaining ecosystem function in urban areas. *Curr Opin Environ Sustain*, 2: 178–184
- Anderson J W. 1976. Selection of trees for endurance of high temperatures and artificial lights in urban areas. *USDA Forest Serv Gen Tech Rep*, 22: 67–75
- Goldbach A, Kuttler W. 2013. Quantification of turbulent heat fluxes for adaptation strategies within urban planning. *Int J Climatol*, 33: 143–159
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science*, 319: 756–760
- Grimmond C S B, Blackett M, Best M J, Barlow J, Baik J J, Belcher S E, Bohnenstengel S I, Calmet I, Chen F, Dandou A, Fortuniak K, Gouvea M L, Hamdi R, Hendry M, Kawai T, Kawamoto Y, Kondo H, Krayenhoff E S, Lee S H, Loridan T, Martilli A, Masson V, Miao S, Oleson K, Pigeon G, Porson A, Ryu Y H, Salamanca F, Shashua-Bar L, Steeneveld G J, Tombrou M, Voogt J, Young D, Zhang N. 2010. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *J Appl Meteorol Climatol*, 49: 1268–1292
- Heisler G M, Brazel A J. 2010. The urban physical environment: Temperature and urban heat island. In: Aitkenhead-Peterson J, Volder A, eds. *Urban Ecosystem Ecology*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. 29–56
- Hu X F, Weng Q H. 2011. Impervious surface area extraction from IKONOS imagery using an object-based fuzzy method. *Geocarto Int*, 26: 3–20
- Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, Plummer N, Wang W C, Karl T R. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 347: 169–172
- Kuang W H. 2011. Simulating dynamic urban expansion at regional scale in Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. *J Geogr Sci*, 21: 317–330
- Kuang W H, Chi W F, Lu D S, Dou Y Y. 2014. A comparative analysis of megacity expansions in China and the U.S.: Patterns, rates and driving forces. *Landscape Urban Plan*, 132: 121–135
- Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, Chi W F, Liu A L, Liu Y, Zhang R H, Liu J Y. 2015. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with *in situ* measurement. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 113–130
- Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, Lu D S, Xiang B. 2013. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century. *Chin Sci Bull*, 58: 1691–1701
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, Kuang W H, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Yu D S, Wu S X, Jiang N. 2010. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *J Geogr Sci*, 20: 483–494
- McGranahan G, Balk D, Anderson B. 2007. The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environ Urban*, 19: 17–37
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and Human Wellbeing: A Framework for Assessment*. Washington: Island Press. 38
- Mooney H A, Duraipapp A, Larigauderie A. 2013. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110 (Suppl): 3653–3656
- Oke T R. 1984. Methods in urban climatology. *Appl Climatol*, 14: 19–29
- Oke T R. 2006. Towards better scientific communication in urban climate. *Theor Appl Climatol*, 84: 179–190
- Oke T R, Crowther J M, McNaughton K G, Monteith J L, Gardiner B. 1989. The micrometeorology of the urban forest [and discussion]. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 324: 335–349
- Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Nilon C H, Pouyat R V, Zipperer W C, Costanza R. 2001. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annu Rev Ecol Syst*, 32: 127–157
- Pielke R A, Adegoke J, Beltrán-Przekurat A, Hiemstra C A, Lin J, Nair

- U S, Niyogi D, Nobis T E. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. [Tellus B-Chem Phys Meteorol](#), 59: 587–601
- Ridd M K. 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. [Int J Remote Sens](#), 16: 2165–2185
- Seto K C, Güneralp B, Hutya L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 109: 16083–16088
- Wu J G. 1999. Hierarchy and scaling: Extrapolating information along a scaling ladder. [Can J Remote Sens](#), 25: 367–380
- Wu J G, Jenerette G D, David J L. 2003. Linking land-use change with ecosystem processes: A hierarchical patch dynamic model. In: Guhathakurta S, ed. *Integrated Land Use and Environmental Models*. Berlin: Springer. 99–119