

城市地表热环境健康风险动态评估模型构建及应用研究

□ 宁云飞, 张毅

[摘要]四十多年来,我国快速城镇化过程所引起的生态环境问题导致城市地表热环境的剧烈变化,而当前通过理论模型与实证研究来构建基于规划管控要素的热环境动态评估系统的研究仍比较欠缺。文章在对城市地表热环境的影响要素进行分析的基础上,基于武汉市汉阳区地表温度反演与关键热环境影响要素的相关性分析,建立城市地表热环境健康风险动态评估模型,并运用评估模型对中法生态城地表热环境进行动态模拟和风险评估,提出面向地表热环境风险的空间规划管控对策,以期为今后更好地开展城市地表热环境健康风险动态评估研究提供参考。

[关键词]地表热环境;规划管控;关键要素;动态评估

[文章编号]1006-0022(2021)S1-0145-08 **[中图分类号]**TU984 **[文献标识码]**B

[引文格式]宁云飞,张毅.城市地表热环境健康风险动态评估模型构建及应用研究[J].规划师,2021(增刊2):145-152.

Research on the Construction and Application of Urban Surface Thermal Environment Health Risk Dynamic Assessment Model/Ning Yunfei, Zhang Yi

[Abstract] The ecological environment problems caused by the rapid urbanization in China have directly led to the drastic changes of the urban surface thermal environment over the past four decades. Researches on dynamic evaluation system of thermal environment through theoretical model and empirical research are still rare. Based on a correlation analysis between surface temperature inversion and key thermal environment influencing factors in Hanyang District, Wuhan, a quantitative relationship model between surface temperature and key thermal environment influencing factors is established, and the evaluation model is used to simulate and evaluate the surface thermal environment of the Sino-French Eco-City. The paper proposes spatial planning management and control countermeasures for thermal environment risks, in order to provide a reference for better development of urban surface thermal environment health risk dynamic assessment research in the future.

[Key words] Urban surface thermal environment, Planning and control, Key elements, Dynamic assessment

0 引言

四十多年来,随着我国城镇化进程的快速推进,非农产业、城镇人口和各类生产要素迅速向大城市区域聚集,集聚的人类活动又不断加剧对城市生态环境和资源的负面影响,这种影响反过来对城镇化的继续发展形成约束,造成了诸多“城市病”。城市“热”病就是诸多“城市病”中的一种。

为了积极应对“城市病”,各个城市积极转变发展方式,“健康城市”“宜居城市”“生态城市”等也应

运而生。健康、宜居、生态、低碳都是人们对城市发展状况的评价和期望,综合起来即形成了一套关于城市良性发展的评价体系。本研究的出发点便是在城市良性发展的评价体系的整体思路框架下,研究和构建其中至关重要的地表热环境评估系统。

1 城市地表热环境的影响要素

与城市地表热环境有直接关系的因素有很多,包括下垫面改变(用地和空间形态层面)、气候因素、太

[作者简介] 宁云飞,高级规划师,注册城乡规划师,现任职于武汉市规划研究院。

张毅,高级规划师,注册城乡规划师,现任职于武汉市规划研究院。

表 1 各类土地利用类型热环境贡献率

地表类型	土地利用类型	热环境贡献率
草地	草地、待建设用地	1.07
耕地	各类耕地	1.06
林地	林地、绿地	0.90
人工表面	除公园绿地外各类城市建设用地	1.08
湿地	各类河流、湖泊、坑塘、季节性湿地等	0.95

阳辐射、人为活动及大气污染等。本研究通过大量的文献分析，提取出与城市地表热环境密切相关并相互作用的六大关键影响要素，包括土地利用类型、建筑密度、容积率、建筑高度、水环境和绿地率。这六大要素也是城市规划管控的重要指标，在城市规划的编制、审批和实施管理中都具有重要的作用。

(1) 土地利用类型。
土地利用类型会直接影响地表辐射和热排放特征，并间接影响城市通风格局，由此深刻影响着城市不同尺度的热环境特征。基于文献分析，可以得出结论：在不同土地利用类型热环境贡献率 (HC_{lu}) 中，生态绿地类型有助于降低城市热环境效应，而建筑类用地类型会加剧城市热岛效应。因此，在已有研究基础上^[14]，本研究根据武汉市区域气候条件，总结了各类土地利用类型热环境贡献率 (HC_{lu}) (表 1)。

(2) 建筑密度。
城市建成区的建筑密度能够显著影响地表热环境，建筑密度越高，相对于非建筑地区，地表温度或气温越高。根据已有研究^[15]，设定建筑密度效应指数为 0.167，即随着建筑密度增加，热岛效应增加；当建筑密度达到 1 时，升温效率为 1.167。建筑密度热环境贡献率 (HC_{bd}) 计算公式如下：
$$HC_{bd} = 1 + 0.167 \times BD$$
 式(1)
式中，BD 为建筑密度。
(3) 容积率。
容积率对地表热环境的影响相对复

杂，其与建筑密度、建筑高度、建筑间距、建筑布局都存在关系。基于已有研究成果^[9-11]，确定容积率热环境贡献系数为 0.143，即当城市片区内的容积率达到最大值时，其对城市气温的贡献率为 1.143。容积率热环境贡献率 (HC_{far}) 计算公式如下：

$$HC_{far} = 1 + 0.143 \times Far_{ND}$$
 公式(2)
$$Far_{ND} = (Far - Far_{min}) / (Far_{max} - Far_{min})$$
 公式(3)

式中， Far_{ND} 为归一化建筑容积率，其值介于 0 ~ 1。
(4) 建筑高度。
由于在控规单元的尺度上，地表温度与平均建筑高度呈显著正相关。根据已有研究成果^[11-12]，确定建筑高度热环境贡献率 (HC_{bh}) 为 0.2，即当建筑物达到最大热环境贡献率时，其对城市气温的贡献率为 1.2，在不同的建筑物高度等级上，其对城市地表热环境的影响不同。

(5) 水环境。
湿地的热辐射能力相对于城市不透水层要差得多，大大降低了湿地地表及其周边区域的显热交换能力，改变了城市地表热环境，最终改变了城市地表热环境的变异程度及空间分布。根据已有研究成果^[13-16]，确定水体降温的有效作用距离为 1 km，当距离超过 1 km 时，其对城市地表热环境的贡献率为 0，并根据相关成果确定水环境热环境贡献率 (HC_{w})。
(6) 绿地率。
绿地面积增加能显著降低夏季局部温度，且降温效应与绿地面积、布局、类型相关，一般来说，绿地面积越大，降温效率越高。根据已有研究成果^[16-18]，确定绿地率与温度间的相关系数为 -0.225，即其降温系数随绿地率升高而增加。绿地率热环境贡献率 (HC_{gr}) 计算公式如下：

$$HC_{gr} = 1 - 0.225 \times GR$$
 公式(4)
式中，GR 为绿地率。

2 城市地表热环境健康风险动态评估模型构建思路

本研究以武汉市汉阳区集中建设区的部分区域为研究对象，研究范围东至长江、北至汉江、南和西均至三环线，面积约为 80 km² (图 1)。选择汉阳区为实证研究对象，一是因为汉阳区拥有长期的规划信息资源储备，能够清晰反映规划管控要素对城市地表热环境的作用；二是因为其作为武汉市的中心城区，拥有大量的遥感影像资源，便于获取地表温度数据。

2.1 城市地表热环境变化分析

本研究选择 2005 年、2010 年、2018 年 3 个年份的 Landsat 系列遥感卫星影像数据，采用单窗算法进行地表温度反演。为消减云量和天气条件的影响，以及不同年份获取的数据采集日期差异的影响，在地表温度分级数据分析中采用标准差分等级方法将地表温度分为 5 个等级，即低温区 (<-1.5STD)、较低温区 (-1.5STD ~ -0.5STD)、中温区 (-0.5STD ~ 0.5STD)、较高温区 (0.5STD ~ 1.5STD) 和高温区 (>1.5STD)。
在此基础上，本研究按照分级标准分别对 3 个年份地表温度反演结果的统计值进行数据格式转换操作，生成分辨率为 100 m × 100 m 的栅格数据空间，并按照最大面积原则确定跨边界数据归属。
分析结果显示，随着城镇化进程的

加快, 2005~2018年汉阳区城市地表热环境的空间构成特征变化显著。整体来看, 中温区面积较大, 占比为26.54%~45.42%; 较高温区面积次之, 占比为25.90%~36.56%; 低温区和较低温区面积占比在不同年份间在10%左右波动; 高温区面积较小, 但逐年增加。

同时, 3个年份间的地表温度反演结果表现出明显的空间变异性。2005年城市地表热环境各等级类型在空间上呈现出显著的集中分布特点, 其中高温区集中且连片分布在鹦鹉大道、汉阳大道、龙阳大道沿线的住宅和工业片区, 中温区集中连片分布且较少出现破碎化特征, 低温区主要为长江、汉江水面; 2010年不同温度等级的区域分布略有分散, 高温区分布面积增加, 且零星分布点增多; 2018年汉阳区的城市地表热环境空间分布呈现出高温区和较高温区连绵的现象(图2~图4)。

2.2 城市地表热环境影响要素定量分析

按照上文所述的模型构建思路, 本研究利用ArcGIS统计各单元网格内的自变量, 计算各单元网格的城市地表热环境贡献率因子值, 并进一步结合因变量(地表温度)对其相关性进行统计分析。

分析结果表明, 不同年份间的地表温度与六大影响要素相关性多为极显著相关($p<0.01$), 说明各个要素对地表温度的影响较为显著, 但不同要素的相关系数存在差异, 不同年份的分析结果存在波动性, 表明影响要素对地表温度的作用较为复杂(表2)。不同年份的土地利用类型、水环境两类要素的热环境贡献率相关系数均处于较高水平, 超过0.47。建筑密度和建筑高度与地表温度间的热环境贡献率相关系数介于0.151~0.487, 绿地率与地表温度间的热环境贡献率相关系数较小, 其中在2005年的相关性不显著。其原因可能是在城市发展初期,

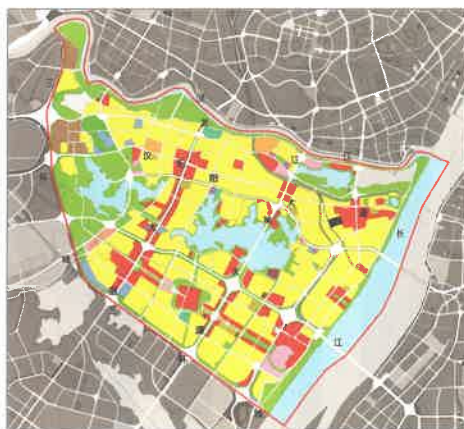


图1 研究范围

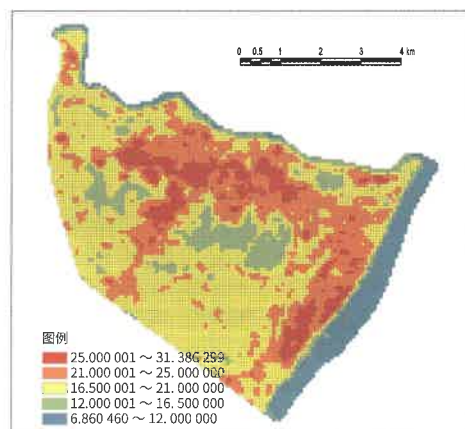


图2 2005年研究区域城市温度等级空间分布
注: 空间格网大小为100 m×100 m。

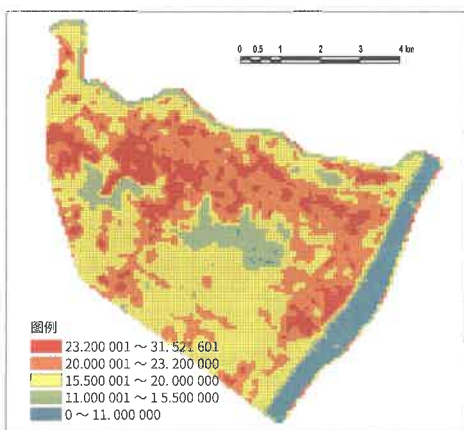


图3 2010年研究区域城市温度等级空间分布
注: 空间格网大小为100 m×100 m。

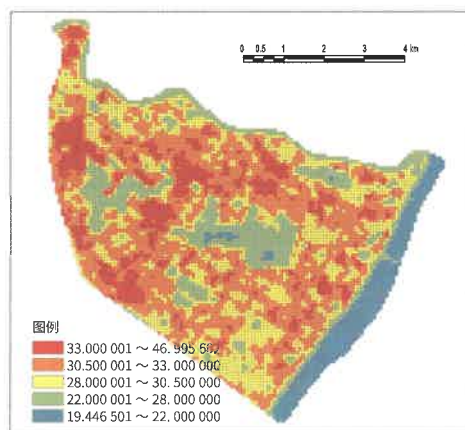


图4 2018年研究区域城市温度等级空间分布
注: 空间格网大小为100 m×100 m。

表2 地表温度与六大影响要素的相关性

因变量	土地利用类型	建筑密度	建筑高度	水环境	绿地率	容积率
2005年地表温度	0.630**	0.240**	0.151**	0.637**	0.018	0.171**
2010年地表温度	0.602**	0.430**	0.257**	0.592**	0.066**	0.183**
2018年地表温度	0.572**	0.487**	0.223**	0.473**	-0.104**	0.150**

注: “**”表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

表3 地表温度与六大影响要素的线性回归拟合结果

因变量	土地利用类型	建筑密度	建筑高度	水环境	绿地率	容积率	常数
2005年地表温度	27.74	32.058	11.555	88.362	1.348	-71.331	-63.324
2010年地表温度	26.912	28.396	2.447	65.528	-1.152	-20.784	-77.524
2018年地表温度	22.006	47.741	-3.382	31.841	-12.338	-16.277	-39.478

城乡二元格局特征显著, 土地利用类型对城市地表热环境贡献率较高, 水环境对降温的贡献较大, 但绿地率的贡献较小; 随着城市化推进, 城乡界线越来越

模糊, 土地利用类型对城市地表热环境的影响逐渐被其他一些因素所取代, 如建筑密度、建筑高度等。

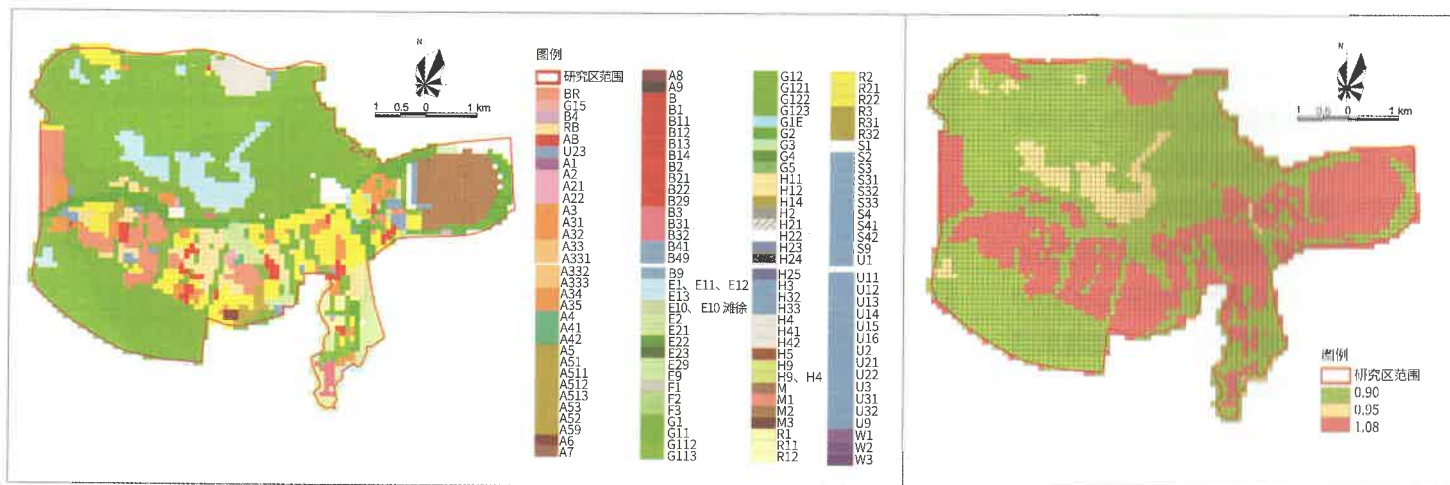


图5 土地利用类型空间分布(左)及热环境贡献率识别(右)

2.3 拟合分析后的动态评估模型构建

运用 SPSS 软件,对 3 个年份的地表温度与热环境影响要素进行逐步回归分析,发现六大影响要素的线性回归方程决定系数均超过 0.90,且回归方程为极显著(表 3)。2005 年、2010 年、2018 年地表温度与六大影响要素的回归方程拟合分别如下:

$$LST=27.74 \times HC_{lu} + 32.058 \times HC_{bd} + 11.555 \times HC_{bh} + 88.362 \times HC_{dw} + 1.348 \times HC_{gr} - 71.331 \times HC_{far} - 63.324$$

公式(5)

$$LST=26.912 \times HC_{lu} + 28.396 \times HC_{bd} + 2.447 \times HC_{bh} + 65.528 \times HC_{dw} - 1.152 \times HC_{gr} - 20.784 \times HC_{far} - 77.524$$

公式(6)

$$LST=22.006 \times HC_{lu} + 47.741 \times HC_{bd} - 3.382 \times HC_{bh} + 31.841 \times HC_{dw} - 12.338 \times HC_{gr} - 16.277 \times HC_{far} - 39.478$$

公式(7)

公式(5)~公式(7)中, LST 表示地表温度, HC_{lu} 表示土地利用类型热环境贡献率, HC_{bd} 表示建筑密度热环境贡献率, HC_{bh} 表示建筑高度热环境贡献率, HC_{dw} 表示水环境热环境贡献率, HC_{gr} 表示绿地率热环境贡献率, HC_{far} 表示容积率热环境贡献率。上述公式中的数字代表线性回归拟合校正系数。

总体来看,不同城市发展时期所得

到的地表温度与城市地表热环境影响要素间的相互关系均表现出显著性,具有较高可信度。不同时期,各要素对城市地表温度的影响表现出一定差异,这种差异可以理解为不同城市发展阶段中,不同城市规划管控指标在调控城市地表热环境中的作用会发生变化,因此对城市地表热环境的管控必须充分考虑城市化发展水平。

由于城市规划对六大影响要素的控制大多属于目标控制,从时效性方面考虑,在采用评估模型模拟未来地表温度状况时,应当选取最接近规划方案最终发展蓝图的场景阶段。因此,在上述 3 种线性回归拟合结果中,拟选取 2018 年的地表温度回归方程作为最终确定的评估模型。

3 城市地表热环境健康风险动态评估模型的实践应用

3.1 应用对象的基本情况

中法生态城位于武汉市西部汉江上游沿岸,汉阳区与蔡甸区交界处,是中法两国政府合作项目,至 2030 年,生态城规划建设用地面积为 17 km²,规划总人口为 20 万。

本研究选取中法生态城作为城市地表热环境健康风险动态评估模型的实践应用对象,出于以下三方面考虑:一是

当前中法生态城规划编制较为完善,能够获得较全面的六大热环境影响要素规划信息;二是中法生态城目前仍处在建设初期阶段,建设前的评估有助于支撑相应管控措施的制定,体现了评估模型对城市地表热环境的主动管控和积极引导作用;三是中法生态城作为生态宜居新城,形成良好的地表热环境契合其自身可持续发展、生态优先和绿色发展的目标。

3.2 分析城市地表热环境六大影响要素及热环境贡献率

本研究以中法生态城控规的用地布局方案与主要管控指标为基础,分别提取六大影响要素,在 100 m×100 m 的空间取样尺度上进行制图分析,得出各类要素的特征。

(1) 土地利用类型特征。

根据模型确定中法生态城土地利用类型热环境贡献率包括 3 个等级,分别为 0.90、0.95、1.08,三类热环境贡献率空间分布较为集中,土地利用类型热环境贡献率高的区域主要分布在建设用地区域,呈块状分布特征,土地利用类型热环境贡献率较低的区域主要为研究区内的水体——什湖及后官湖相邻区域,其余部分广泛分布土地利用类型热环境贡献率低的区域(图 5)。

(2) 建筑密度特征。

规划用地内的建筑密度整体较低,建设用地集中分布区的平均建筑密度较高,而多数地区的建筑密度处于较低水平。根据模型按建筑密度热环境贡献率将研究区域分为 5 个等级,建筑密度热环境贡献率低(1.000~1.012)的区域面积最大,其面积占比达到 61.72%;建筑密度热环境贡献率中等(1.027~1.038)的区域面积次之,面积占比达到 15.16%;建筑密度热环境贡献率较高(1.039~1.049)的区域面积占比为 13.72%(图 6)。

(3) 建筑高度特征。

高层建筑主要集中分布在集中建设区,尤其是中西部地区轨道站点附近的高层建筑较为集中。建筑高度热环境贡献率呈现显著的区域带状分布特征,建筑高度热环境贡献率为 1.20 的区域面积占比达到 20.24%,而低值区域(建筑高度热环境贡献率为 1.00)面积超过 69%(图 7)。

(4) 容积率特征。

单元网格平均容积率在 0~3.0 变化,高容积率呈现区块分布特征,集中在地铁 4 号线沿线区域。容积率热环境贡献率高的区域(>1.089)面积占比较低,其分布与建筑分布相一致,容积率热环境贡献率低的区域面积占比高达 68.22%(图 8)。

(5) 绿地率特征。

中法生态城平均绿地率分布与建筑相关指标空间分布呈现互补特征。绿地率热环境贡献率低的区域面积占比达到 47.71%,绿地率热环境贡献率高的区域面积占比为 9.76%(图 9)。

(6) 水环境特征。

中法生态城周边地区水域分布较广,区域内的什湖、后官湖和邻接的汉江等水面使该区域至水体距离空间分布呈现明显的复杂性。除水环境热环境贡献率高的区域面积占比较高(达到 30.89%)外,其余等级区域面积占比较接近,在 14.01%~19.45%(图 10)。

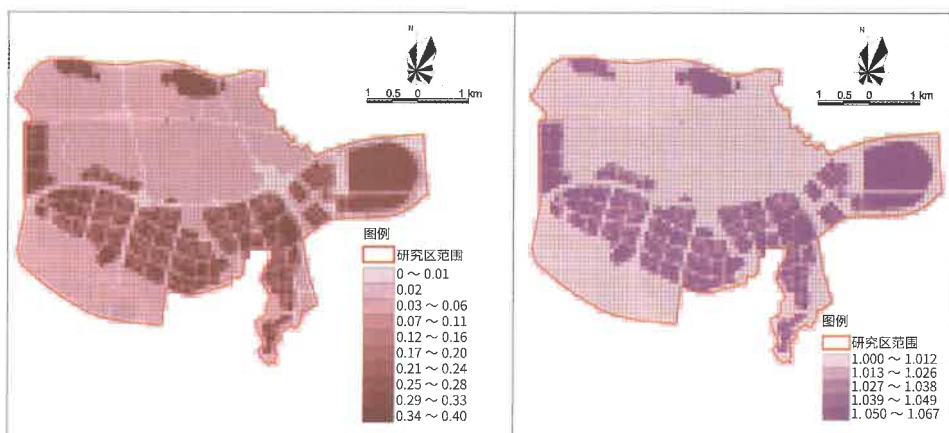


图 6 建筑密度空间分布(左)及热环境贡献率识别(右)

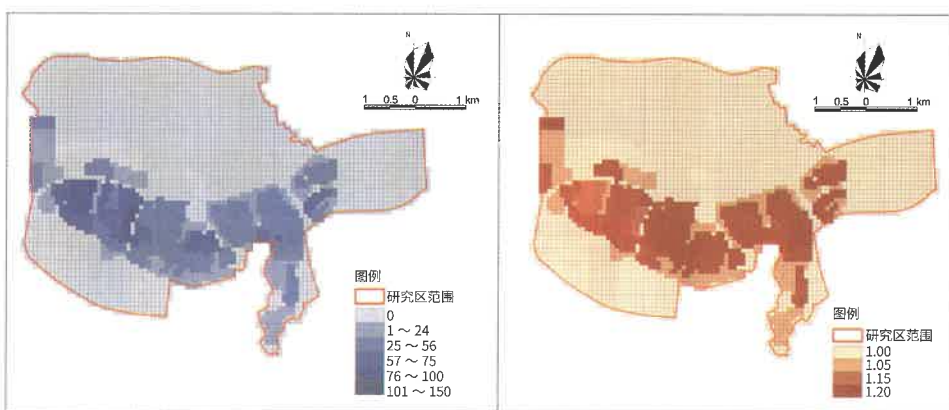


图 7 建筑高度空间分布(左)及热环境贡献率识别(右)

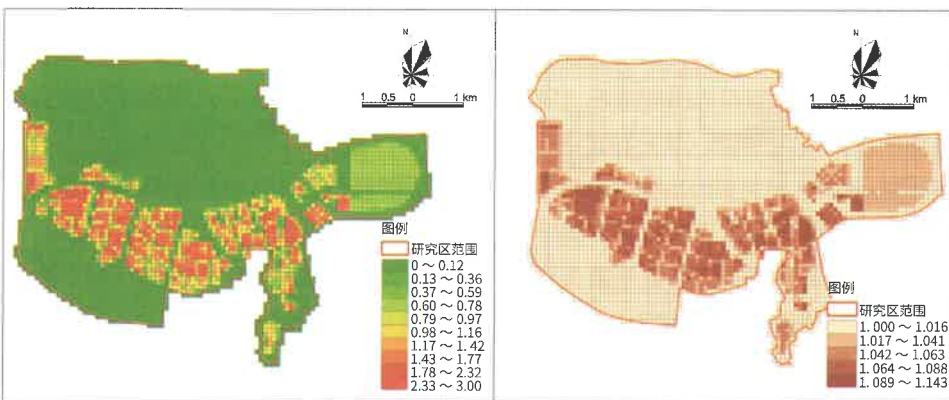


图 8 容积率空间分布(左)及热环境贡献率识别(右)

3.3 模拟城市地表热环境特征

采用上述各类地表热环境贡献率因子,代入 2018 年地表温度与六大影响要素回归方程,预测中法生态城区域不同空间单元网格尺度上的热环境数值。模拟结果显示,热环境拟合相对温度介于 24.82~34.85℃,相对温度平均值为

29.865℃,标准差为 2.316。其整体温度较高,区域之间温度差异较小,中温区、较低温区和较高温区等中等温度区域面积所占比例较高。

根据模型模拟结论,按照正负 0.5 和 1.5 个标准差等级,可划分为五类热环境温度区,这在一定程度上反映了现有规划

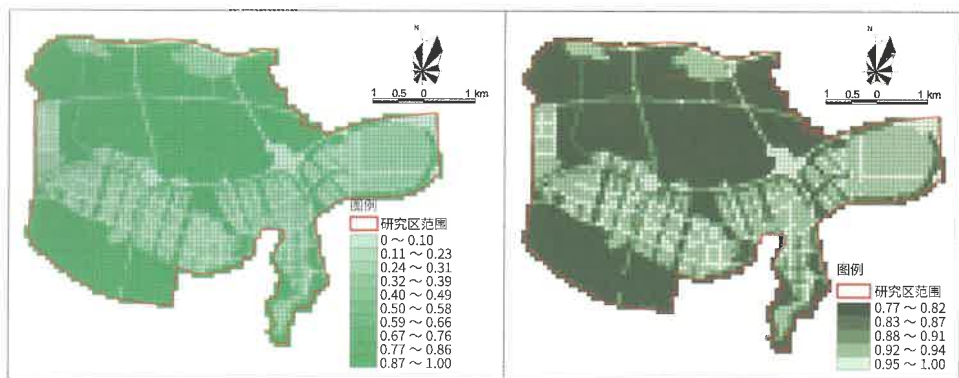


图9 绿地率空间分布 (左) 及热环境贡献率识别 (右)

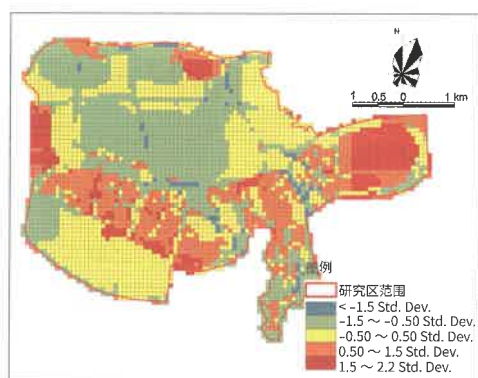


图11 地表热环境空间分布特征

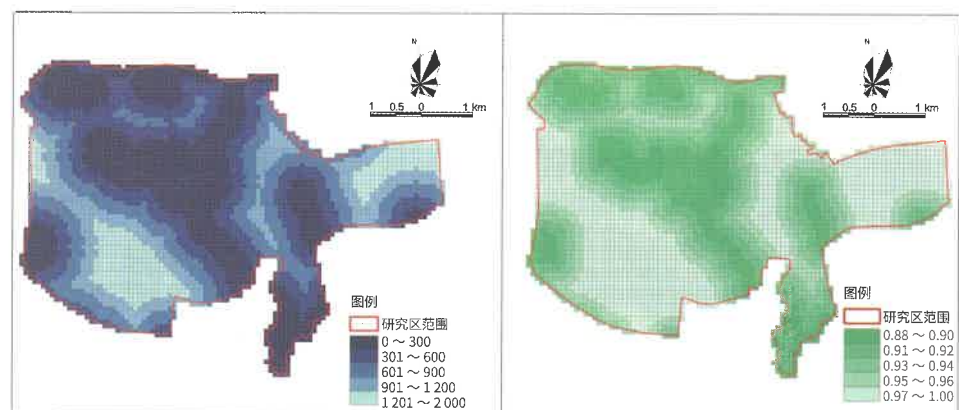


图10 水环境空间分布 (左) 及热环境贡献率识别 (右)

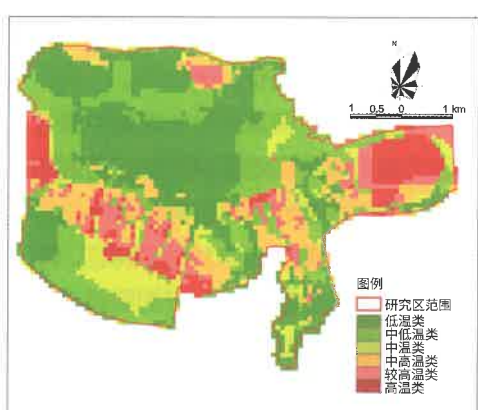


图12 叠加综合分析的地表热环境空间等级分布特征

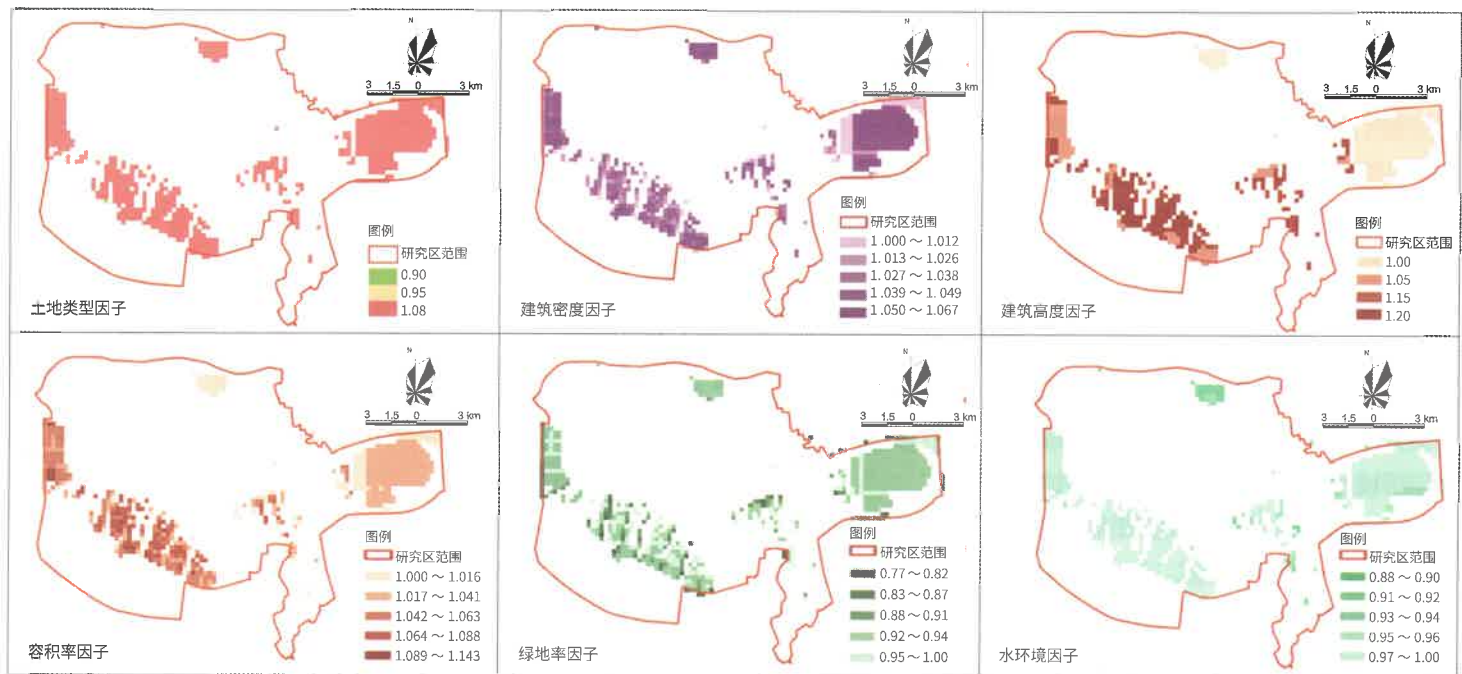


图13 典型热岛组团的影响要素回溯分析

条件下中法生态城的地表热环境空间分布特征。高温区集中分布于东部的东风雷诺厂区、西部的蔡甸工业园区；西南部地铁4号线地区有少量高温斑块离散分布；较

高温区主要集中在地铁4号线沿线周边地区，且分布连续；低温区和较低温区集中连片分布，但破碎化特征突出，呈现与中温区交错分布的特征 (图 11)。

3.4 识别城市地表热环境风险

在识别地表热环境风险之前需要对模型模拟结果进行更深入的逻辑认识。按照对标准差分类方法的定义，通过单

元值与整体平均值之间的标准差进行等级划分, 仅是对区域内各单元温度的简单对比, 即在任何模拟结论下都可划分出规模大致相同的五类温度区, 甚至在整体温度较低的模拟状态下, 相对的高温区或中高温区的分布可能更广。因此, 不能以标准差等级划分直接认定地表热环境风险区域。

从城市地表热环境健康和可持续发展的角度出发, 考虑到热扩散和空气对流等实际情况, 离散的、局部小规模的地表高温区是可以接受的, 也是难以避免的, 真正需要关注的是连片的地表高温集中区域, 尤其是连片高温区的核心位置。

基于上述考虑, 本研究设定了相应的地表热环境风险识别判定标准, 即将较高温区进行进一步的热环境风险识别, 将局部较高温区和与高温区间隔的连片较高温区区别对待, 以突出地表热环境风险的重点区域(表4)。

通过对地表热环境模拟的空间数值特征进行地理加权回归分析, 识别地表热环境的潜在风险, 确定城市风险关键单元分布区。总体来看, 中法生态城地表热环境综合风险识别结果呈现明显的空间组团分布特征, 低温类、中低温类地表热环境风险区分布范围较广, 构成了地表热环境的本底特征, 表明中法生态城总体地表热环境风险较低。但研究结果也显示, 高温类和较高温类地表热环境风险区也呈现组团式分布的特征, 形成了4个组团, 沿地铁4号线和东部地区分布, 特别是东部地区的地表热环境风险区较集中分布, 形成了典型的热岛特征(图12)。

3.5 应对地表热环境风险的管控对策

在地表热环境风险识别的基础上, 应通过采取合理的规划管控措施降低城市热岛效应, 避免或者减轻城市热岛效应对居民健康和产业发展造成的损害。本研究提出的模型在对接规划管控方面

表4 城市地表热环境总体风险等级判断标准

城市地表热环境风险判断标准	综合风险等级	备注
高温区	高温类	城市地表热环境风险高, 应重点考虑治理
在一定范围内与高温区相间的较高温区	较高温类	城市地表热环境风险较高, 需要局部治理
其他较高温区	中高温类	具有一定的城市热环境风险
中温区	中温类	风险低
较低温区	中低温类	冷岛
低温区	低温类	冷岛

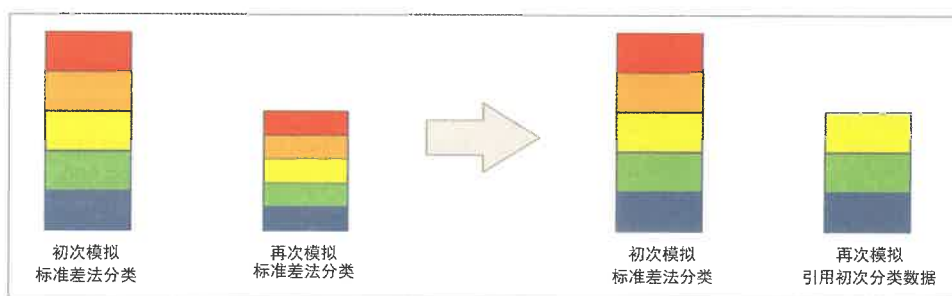


图14 不同分类方法对模拟结论的影响

具有较显著的优势: 一是在模型尺度方面, 不同于其他现有研究的中、宏观尺度的区域气候模型, 本研究尺度较为微观, 能够适用于规划管控需要; 二是在模型要素方面, 本研究所选取的六大地表热环境影响要素正是城乡规划中重点管控的规划要素。基于此, 本研究提出以下规划管控对策。

3.5.1 识别风险区域和规划管控要素

对中法生态城高温类情境和较高温类情境进行综合分析后发现, 高温类风险区和较高温类风险区呈现出的4个组团形成了典型的热岛特征。在模型的回溯分析中将这四个组团内的主要影响要素进行整理, 识别出主要影响要素为土地利用类型和建筑密度(图13)。

3.5.2 回溯计算因子和确定调整规则

针对六大影响要素对地表热环境影响的自身属性, 制定相应的降低地表热环境风险的规划调整规则。按照六大影响要素对优化地表热环境的不同作用类型, 可大致将其分为三类: 一是择优选取型, 包括土地利用类型; 二是正影响

型, 包括绿地率、水环境; 三是负影响型, 包括建筑密度、建筑高度和容积率。因此, 对主要的地表热环境风险区域的具体规划要素调整规则可概括为: 一是优化用地布局, 增加热环境贡献率较低的用地比例; 二是增加地块绿地率指标和水域面积; 三是优化总体建筑量空间布局, 合理设置容积率、建筑密度和建筑高度。

在具体制定调整优化方案的过程中, 需要同时考虑城市发展的要求, 对于整体建设量不宜做过多的削减, 故地块容积率宜在一定区域范围内进行均衡调整。而在容积率大致不变的情况下, 建筑密度和建筑高度两者存在负相关性。

相关研究提出“天空视域因子”概念, 认为平均空气温度与平均天空视域因子之间存在着良好的线性关系, 而平均天空视域因子与建筑密度及建筑高度之间的关系为二次方的抛物线关系。可将相关研究主要结论概括为: 当建筑密度<36%时, 建筑高度对平均空气温度起着主导作用; 当建筑密度>36%时, 建筑密度对平均空气温度起主导作用。

3.5.3 对具体调整方案的再评估和再预警

在确定实施规划调整方案或相关管控对策之前,可以通过模型再次模拟改善后的方案。在具体过程中,需要特别注意后续特征模拟的等级划分方法,避免在每次结论中得到相似的各类温度区分布结果,避免无法凸显优化方案的效果。

这是由于初次模拟的特征划分采取了标准差的划分方案,即以各点温度与区域平均温度的偏离值进行等级分类,确定区域热岛、冷岛等。虽然这对识别热环境特征有很大帮助,但在再次模拟及后续的过程中若仍采用标准差方法,则结论仍将呈现数量相同的五类分区。因此,后续模拟不应采取标准差分类方法,而应引用初次模拟的具体等级分段数据(图14)。

4 结语

本研究综合运用遥感地表温度反演和规划管控指标因子进行城市地表热环境健康风险动态评估,筛选确定了六类关键地表热环境规划管控指标,构建了具有局部气候适应性的城市地表热环境健康风险动态评估模型,并对中法生态城开展了城市地表热环境健康风险动态评估。本研究能较好地适应城市规划和管控需求,为定量评估城市地表热环境特征和风险提供了参考,同时也为中法生态城城市建设发展提供了支持。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] Jusuf S K, Wong N H, Hagen E, et al. The Influence of Land Use on the Urban Heat Island in Singapore[J]. *Habitat International*, 2007(2): 232-242.
- [3] Feyisa G L, Meilby H, Jenerette G D, et al. Locally Optimized Separability Enhancement Indices for Urban Land Cover Mapping: Exploring Thermal Environmental Consequences of Rapid Urbanization in Addis Ababa, Ethiopia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016(175): 14-31.
- [4] 王佳, 钱雨果, 韩立建, 等. 基于 GWR 模型的土地覆盖与地表温度的关系——以京津唐城市群为例[J]. *应用生态学报*, 2016(7): 2 128-2 136.
- [5] Perini K, Magliocco A. Effects of Vegetation, Urban Density, Building Height, and Atmospheric Conditions on Local Temperatures and Thermal Comfort[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014(3): 495-506.
- [6] Yang F, Lau S S Y, Qian F. Summertime Heat Island Intensities in Three High-rise Housing Quarters in Inner-city Shanghai China: Building Layout, Density and Greenery[J]. *Building and Environment*, 2010(1): 115-134.
- [7] 葛亚宁, 徐新良, 李静, 等. 北京城市建筑密度分布对热岛效应的影响研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016(12): 1 698-1 706.
- [8] 郭尚霖, 孙一民. 城市设计要素对热岛效应的影响分析——广州地区案例研究[J]. *建筑学报*, 2015(10): 79-82.
- [9] Zhao C J, Fu G B, Liu X M, et al. Urban Planning Indicators, Morphology and Climate Indicators: A Case Study for a North-south Transect of Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 2011(5): 1 174-1 183.
- [10] Lin P Y, Lau S S Y, Qin H, et al. Effects of Urban Planning Indicators on Urban Heat Island: A Case Study of Pocket Parks in High-rise High-density Environment[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017(168): 48-60.
- [11] 岳文泽, 刘学. 基于城市控制性详细规划的热岛效应评价[J]. *应用生态学报*, 2016(11): 3 631-3 640.
- [12] Yang X Y, Li Y G. The Impact of Building Density and Building Height Heterogeneity on Average Urban Albedo and Street Surface Temperature[J]. *Building and Environment*, 2015(90): 146-156.
- [13] Coutts A M, Tapper N J, Beringer J, et al. Watering our Cities: The Capacity for Water Sensitive Urban Design to Support Urban Cooling and Improve Human Thermal Comfort in the Australian context[J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 2013(1): 2-28.
- [14] Sun R H, Chen A L, Chen L D, et al. Cooling Effects of Wetlands in an Urban Region: The Case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 2012(20): 57-64.
- [15] 崔丽娟, 康晓明, 赵欣胜, 等. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2015(1): 212-218.
- [16] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity[J]. *Science of the Total Environment*, 2017(584): 1 040-1 055.
- [17] Jenerette G D, Harlan S L, Buyantuev A, et al. Micro-scale Urban Surface Temperatures are Related to Land-cover Features and Residential Heat Related Health Impacts in Phoenix, AZ USA[J]. *Landscape Ecology*, 2016(4): 745-760.
- [18] 李小龙, 杨英宝, 曹利娟, 等. 基于遥感和 CFD 模拟的城市绿地形态对热环境的影响研究[J]. *遥感技术与应用*, 2016(6): 1 150-1 157.

[收稿日期] 2021-05-20