# 城市绿地热缓解溢出效应的供需关系及其调控机制研究

## 项目的立项依据

### 研究意义

【up2024 0304 11:38】

随着气候变化和城市化的推进，我国正面临着极端天气气候事件增加的风险。受其影响，居民的热舒适度下降，老年人等脆弱群体的健康风险增加，城市人居环境面临严峻挑战（Manoli et al., 2019；Tuholske et al., 2021；黄晓军等，2020）。为应对相关风险，生态环境部等17部门联合印发的《国家适应气候变化战略2035》提出了建设气候适应型城市的迫切需求。在此背景下，深化对城市气候特征的认识，通过城市规划与管理手段来对城市气候进行调节具有重大意义。

城市绿地的降温效应已得到广泛的研究，其不仅局限于绿地自身的覆盖区域，更显示出显著的溢出效应。具体而言，绿地能够有效降低相邻区域的温度，对周边环境产生积极的影响。然而，尽管绿地广泛分布于全球各大城市，城市过热问题仍未得到有效解决。在部分植被覆盖比例较高的城市区域，仍可观察到与高温相关的较高死亡风险（Pascal et al., 2021）。此外，部分特定的城市区域（如滨水地带）在绿地影响下的降温强度相较于其他建成区而言偏低（Liu et al., 2023）。因此，在不同城市之间乃至同一城市内部的不同区域之间，绿地在提供热缓解方面的能力存在显著差异。

此外，随着城市空间布局的多样化，城市内不同区域的人口密度以及居民的社会经济状况，如年龄结构和收入水平等，呈现出显著的差异性。一项在我国柳州的研究指出，城市公园作为重要的降温服务提供者，其影响范围内的房价水平显著偏高（Shi et al., 2023）。这一现象表明，享受公园降温服务的机会并不均等，低收入居民在获取城市降温资源方面的可达性较差，凸显了城市气候资源分配的不平等问题。可见，城市热缓解的实际需求存在较大的空间分异。

现有研究分析了绿地热缓解的溢出效应。然而，当前对于城市绿地热缓解溢出效应与热缓解实际需求之间的匹配程度及其调控机制尚未有系统性的认识。鉴于此，本研究拟以成都市为例，首先构建一套综合背景气候、社会经济状况等多重因素的指标体系，评估城市热缓解的实际需求；然后通过对实测气象数据的分析，量化城市绿地热缓解溢出效应与影响因素之间的内在联系，对其时空分异进行建模，并结合社会经济数据计算热缓解溢出效应的供应；最后构建一个多元关系框架，旨在将不同区域的绿地热缓解溢出效应的供应与热缓解的实际需求进行耦合，并分析相应的调控机制。

### 国内外研究进展

【up2024 0304 12:16】

绿地通过蒸散作用、提供遮阴条件以及影响空气流动等多重机制，能够有效地调节地表能量交换过程，降低温度，起到缓解城市过热的作用（Bonan, 1997）。绿地的热缓解效应不仅局限于绿地本身，还能通过与相邻区域的气流交换，使周边区域的温度比远离绿地的城市建成区更低。这种现象被称为绿地热缓解溢出效应（Yin et al., 2022）。基于这一概念，我们将从供应、需求以及两者关系的角度出发，对绿地热缓解溢出效应进行系统的梳理与归纳。

#### 1.2.1 城市热缓解需求

【up2024 0304 13:59】

城市的高温环境对人类生活、工作及健康等多个方面造成不利影响，由此催生出热缓解需求。此需求被定义为通过合理的热缓解措施改善城市居民在高温环境下的舒适度的需求。在评估城市热缓解需求的过程中，热危害的物理特性是不可或缺的因素之一。在给定时间范围内的特定区域，当实际热舒适度超出人体可接受的临界值时，会引发对公共健康的潜在威胁。此时，实际热舒适与个体可接受的最大热舒适水平之间的差值，可作为量化热缓解需求的重要指标。

【up2024 0304 14:39】

除此之外，受高温不利影响的人口规模及其结构亦对城市热缓解需求有显著影响。在实际热舒适度相近的背景下，人口高度聚集的区域由于面临更高的热暴露风险，因而对热缓解的需求更为突出 (Estoque et al., 2020)。以我国绵阳为例的一项研究显示，65岁及以上人群在高温环境下的非意外死亡率是65岁以下人群的两倍以上（任宇等，2020）。此外，随着居民收入水平的提升，与高温相关的死亡率呈显著下降的趋势（Coates等，2022）。

【up2024 0304 15:44】

鉴于城市内部各要素布局的非均质性，气象变量和社会经济状况呈显著的空间分异特征。因此，深入分析热缓解需求的空间动态将有助于精准制定热缓解策略。在以往的城市热缓解需求研究中，气象指标主要以温度为核心，涉及高温强度、高温频率等多个方面。然而，相关研究对于与城市居民实际感知更为接近的热舒适度的理解尚显不足。与此同时，在社会经济指标方面，尽管人口因素在热缓解需求的估算中得到了广泛关注，但现有研究缺乏对人口年龄、收入等特征的考虑。

#### 1.2.2. 城市绿地热缓解溢出效应的供应

* 少量研究仅关注蒸发

【up2024 0304 16:53】

城市绿地的降温效应已得到广泛的研究，其不仅局限于绿地自身的覆盖区域，更显示出溢出效应。具体而言，绿地能够有效降低相邻区域的温度，进而改善周边环境的热舒适度，在一定程度上满足城市热缓解的需求。

【up2024 0304 16:57】

研究表明，绿地热缓解溢出效应可延伸至绿地以外数千米的区域。相应的降温强度主要受到两类变量的共同影响：绿地周边的环境特征和绿地自身特征。前者涵盖了绿地相邻区域的土地覆盖类型、建筑高度、道路朝向等诸多因素；而后者则主要涉及绿地大小、形状、连通性以及植被的结构特征。具体而言，随着绿地面积的增加，其在热缓解方面的能力呈现增强的趋势。然而，关于绿地景观配置相对影响的研究则尚未形成一致的结论，与之相关的争议结果可通过案例城市的背景气候、所使用数据的分辨率等因素来解释。

【up2024 0304 17:11】

多种量化指标被用于评估绿地热缓解溢出效应。这些指标包括绿地降温距离、降温面积、降温梯度、降温强度和累积降温等。其中，累积降温考虑了绿地降温随与绿地距离变化的非线性特征。相较于单一的降温距离和降温强度，该指标更能准确反映绿地热缓解溢出效应的整体特征。

【up2024 0304 17:30】

上述指标主要聚焦于绿地对温度的影响，却忽略了湿度等其他因素的作用。事实上，植被通过蒸腾作用能够显著增加环境湿度。以我国北京的一项实证研究为例，小型绿地的存在可使周边环境的相对湿度提升约10% （Yan et al., 2023）。湿度的增加会阻碍人体的散热过程，从而对热舒适度产生不利影响。因此，植被增加对热舒适度的综合影响更为复杂。在未来评估绿地热缓解溢出效应时，应综合考虑绿地对温度、湿度等多个气象因素的调节作用，以更准确地评估绿地在改善城市热环境方面的实际效果。

【up2024 0304 18:09】

以往评估绿地热缓解溢出效应的指标主要侧重于其自然属性，即绿地对气象变量的影响，却忽略了其社会经济属性。在人口分布稀疏的城市区域，受益于绿地热缓解的人群数量有限，这在一定程度上限制了绿地热缓解对城市居民的实际贡献。此外，城市中的不同人群应对热应激的脆弱性存在差异。相较于健康成年人，老年人等脆弱群体对高温环境的适应能力较弱，因此绿地热缓解溢出效应对他们而言具有更大的价值。因此，在全面评估绿地的热缓解溢出效应的供应时，应充分考虑其覆盖范围内的人口特征，包括人口密度、年龄结构等因素。

#### 1.2.3. 城市绿地热缓解溢出效应的供需关系

【up2024 0304 19:44】

为了准确评估城市生态系统服务的供应与需求之间的关系，研究人员开发了生态系统服务框架（Feng等，2022；Wei et al.，2021）。该框架旨在通过建立生态系统功能和过程与人类的实际需求之间的联系，以更好地了解自然环境对人类居住的积极影响。

【up2024 0304 19:50】

生态系统服务是指人类通过直接或间接的方式从生态系统功能中所获得的各种益处 (Costanza et al., 1997)。这些益处包括多方面内容，如城市降温、空气净化、固碳能力提升以及提供室外休闲空间等。当前，仅有少数研究专注于剖析城市降温的供需关系。这些研究普遍采用在0-1分之间进行评分的算法对供应和需求的水平进行定性分析。这种评估方式虽然简单易行，但存在较大的误差，难以准确揭示供应与需求之间的量化关系。

【up2024 0304 20:21】

综上所述，本研究旨在基于灾害性、暴露度和脆弱性相互耦合的理论框架，对城市热缓解需求进行深入分析，并将其与绿地热缓解溢出效应的供应进行量化对比。通过探究其内在的调控机制，本研究期望能够精确评估现有绿地所提供的热缓解溢出效应的不足。这一研究路径不仅有助于我们更全面地理解城市热环境与绿地系统之间的复杂关系，而且将为未来采取针对性的调控措施提供量化依据，从而推动城市热环境的持续优化。

## 研究内容

### 研究目标

### 研究内容

#### 城市热缓解需求

* 通过考虑人口结构（年龄、收入）的空间分布建立一套新的热缓解需求的评估体系。
* 收集相关数据，分析人口分布、年龄和收入特征。
* 估算热缓解需求的时空分布。

#### 通过城市热缓解溢出效应的供应

* 增加对供应的估算

参考A comprehensive framework of cooling effect-accessibility-urban development to assessing and planning park cooling services

#### 2.2.3． 城市热缓解溢出效应的供需关系及其调控机制

* 建立量化的供需关系体系

### 拟解决的关键科学问题

## 研究方案

### 城市热缓解需求

【up2024 0304 20:49】

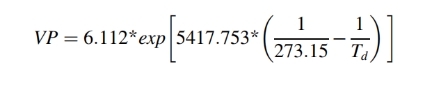
本研究采用灾害性、暴露性与脆弱性相耦合的框架，通过三元因素相乘的方式，对城市热缓解需求的空间分布进行深入分析。具体而言，灾害性因子被视为人均“需求背景值”。将该因子与暴露性因子相乘，可得到单位内整个群体的需求背景。而脆弱性因子则作为由收入、年龄等因素共同驱动的需求权重差异。将这三者相乘，便能全面描绘出单位内的城市热缓解需求值。最后，通过逻辑类推至各个单元，可实现热缓解需求的空间可视化。

【up2024 0304 20:49】

其中，灾害性因子的计算以通用热气候指数（UTCI）为基础，该指数综合考虑了气温（Ta）、蒸气压（VP）、平均辐射温度（Tmrt）和风速（Vs）这四个气象变量。计算模型源自国际生物气象学会（http://www.utci.org/），具体计算公式如下：



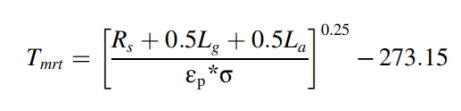
其中，VP的计算如下所示：



其中，Td是露点温度（K）。

【up2024 0304 20:49】

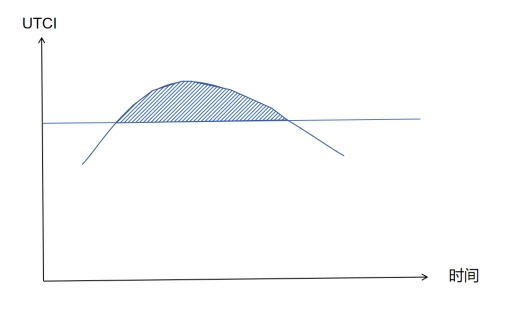
对于Tmrt的计算，本研究采用MENEX模型 (Zhang et al., 2024):



其中，Rs 是人体吸收的短波辐射 (W/m2)，Lg 是地面辐射 (W/m2)，La 是大气辐射 (W/m2)，εp为人体发射率系数。

【up2024 0304 20:49】

在整个夏季期间，UTCI的日最大值会随着日期的推移而呈现动态变化。如下图所示，进入夏季以后，平均最高UTCI呈逐渐上升的趋势，并在某一时刻超过人体可接受的热应力阈值。进入盛夏季节后，UTCI达到峰值，之后逐渐下降，直至再次低于该阈值。为量化这一季节性热应激对城市居民的整体影响，我们引入灾害性因子D，定义为整个夏季期间，逐日平均最高UTCI超过该阈值的累积值，可通过下图所示的阴影面积来表示。



【up2024 0304 20:49】

对于暴露性的评估，我们选用各单元的人口密度作为关键指标。因此，暴露性因子E的计算公式如下：



其中，PD代表人口密度 (人/km2)。

【up2024 0304 20:49】

在评估脆弱性时，本研究着重考虑城市居民的年龄和收入这两个关键因素。  
为了计算脆弱性因子，我们构建了四个核心指标：大于65岁人口比例（PH65）、小于65岁人口比例（PL65）、年收入高于5万人口比例（IH5）以及年收入低于5万人口比例（IL5）。这里，5万元人民币的参考标准是基于成都市的城镇人均可支配收入来设定的。

【up2024 0304 20:49】  
 基于上述指标，我们设计了脆弱性因子V的计算公式。该公式综合考虑了不同年龄段和收入层次人群的比例，以反映他们在面对高温环境时的相对脆弱性。公式如下所示：



其中，KH65，KL65，KH5和KL5分别表示相应指标的权重系数。根据对中国三个典型大城市的研究，65岁以上的老年人在高温环境下的死亡率约为65岁以下人群的3倍（Zhang et al., 2018）。同时，另一项研究指出，收入水平低于当地均值人群的死亡率约为收入高于当地均值人群的两倍（Coates et al., 2022）。因此，我们将PH65的权重系数KH65设置为3，将PL65的权重系数KL65设置为1。同样地，对于经济收入层面的考量，KH5和KL5分别被设为2和1。

### 城市热缓解溢出效应的供应

（1）绿地及其周边气象数据的实地测量

【up2024 0305 11:34】

本项目拟以成都为例，选择10个代表性的城市绿地，开展实地测量研究（图1）。所选的公园形状相对规则，面积均介于0.5至1平方千米之间，且广泛分布于成都城区各处，能够全面反映城市绿地的多样性及其空间布局特征。所选绿地的详细信息如表1所示。

【up2024 0305 11:39】

针对每个选定的城市绿地，我们在其周边以不同的距离设置了多个测量点。在每个测量点，我们采用了高精度的Fluke 971 温湿度计进行环境参数的采集。该设备被放置在1.2米的高度，以记录空气温度（Ta）和相对湿度（Rh）的数值。Fluke 971温湿度计的测量精度为±0.5℃，湿度测量精度为±2.5%。该温湿度计还具备快速响应的特性，其反应时间低于60秒，从而确保了实时数据的及时获取。为了进一步减少外部环境对测量结果的可能干扰，我们特别为设备的外部Ta和Rh传感器配备了多孔黑色屏蔽。

【up2024 0305 11:55】

在盛夏季节，我们选择低风速的无云晴天进行测量。在一天中，我们分别在上午10:00、下午15:00和夜间20:00左右开始进行采样，每次采样过程均控制在80分钟以内，这样的时间安排旨在覆盖人类主要的活动时间段，并尽量减少其他潜在因素的干扰。考虑到不同测量点的数据并非同时获得，我们特别在公园内部选定1个参考点，使用了另一台Fluke 971温湿度计进行连续监测。相关结果将提供可靠的基准，用于后续的数据分析和比较。

（2）绿地降温效应的建模及验证

【up2024 0305 14:06】

针对各城市绿地，我们将对其各个测量点的气象变量及绿地热缓解溢出效应的强度进行分析。通过深入探究这些变量的时空分异，我们旨在揭示它们与环境因素之间的内在联系。

根据既往研究，影响绿地热缓解溢出效应的主要因素涵盖绿地自身的特性以及周边环境的特征。在确保数据可获取性的基础上，选择以下指标作为潜在的影响因素用于后续分析：① 绿地自身特征：绿地大小、NDVI、形状指数。

② 绿地周边环境特征：平均建筑高度、容积率、不透水面覆盖率、建筑面积比。

【up2024 0305 15:36】

针对所提及的环境因素，本项目计划在各个时间点进行相关性分析，以探究它们与绿地热缓解溢出效应之间的潜在联系。我们将以绿地热缓解溢出效应作为因变量，建立一个逐步多元回归模型，以期深入解析环境因素对热效应强度的具体影响。

【up2024 0305 15:37】

基于这一模型，我们将进一步对其他五个绿地的降温效应进行模拟，并验证其模拟结果。若模型的验证精度达到既定标准，我们将把其应用范围扩展至成都市的其他城市公园，以期获取整个城市绿地热缓解溢出效应的空间分布格局。

（3）绿地热缓解溢出效应供应的计算

【up2024 0305 15:53】

通过将各个绿地的热缓解溢出效应的累积强度与其覆盖面积内的人口数量及其脆弱性进行综合分析，我们运用以下公式估算每个绿地在热缓解效应方面的供应水平。

### 城市热缓解溢出效应的供需关系及其调控机制

【up2024 0305 16:14】

通过将绿地热缓解的实际需求与绿地热缓解溢出效应的供应量进行差值运算，我们可以获得城市居民尚未满足的额外热缓解需求，这一差值被定义为城市绿地热缓解需求亏缺。基于成都市的热缓解需求亏缺情况，本研究将开展以下分析。

（1）热点分析

【up2024 0305 16:40】

本研究采用Getis-Ord Gi\*热点分析方法，深入探究热缓解需求亏缺的空间集群分布特征。该方法能够准确识别研究区域内具有统计显著性的高/低值的热缓解需求亏缺的空间聚类，进而精确定位热缓解需求迫切且集中的关键区域。

【up2024 0305 16:55】

在热点分析方法的计算中，具有高值的特征点，可能不是统计上显着的热点。要成为统计上显着的热点，​​某个特征必须具有高值，并且还应该被其他高值特征包围。该方法通过提供每个像素空间依赖性[的](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/autocorrelation)测量并指示像素邻域中值的相对大小，来表征和量化遥感图像的空间自相关。Getis-Ord Gi∗的计算如下 （ESRI, 2016）：



其中 xj是要素 j的属性值，wi ,j是要素 i 和 j 之间的空间权重，n为要素总数，并且：



数据集中每个特征返回的 Gi \*统计量的输出是 z 分数。较高的正 z表示高值（热点）的聚集度更高，较小的负 z 得分表示低值（冷点）的聚集度更高。

在众多衡量不平等的指标中，经济学领域使用的洛伦兹曲线和基尼指数被广泛使用（Gastwirth，1972）。我们遵循宋等人的方法（2021），采用基尼指数指标来评估居民热缓解需求亏缺的不平等性。洛伦兹曲线是人口供给（例如财富）累积分布函数的图形表示。基尼指数定义为公平线与洛伦兹曲线之间的面积与公平线下总面积的比值，代表总体不平等程度。基尼指数的范围从0（绝对公平）到1（绝对不平等），值越低表示越均匀。利用基尼指数做相关研究的研究有很多（Chen等，2022，Zhang等，2020b）。在本研究中，热缓解需求亏缺通过基尼指数来衡量。

基尼指数定义为股本线和洛伦兹曲线之间的面积（A 区）与股本线下方总面积（A 区加 B 区）的比率，其中洛伦兹曲线绘制了该比例居民累积共享的绿地暴露量（y 轴）（x 轴）（图 6）。数据处理在Excel中进行。对于可用性基尼指数，首先根据1000 m缓冲区内的POI数量对数据进行排序，并计算相应的值占所有值之和的百分比（捐赠为Y）。然后将相应的住宅小区占总数的百分比捐献为X。由此，根据式(1)可得到洛伦兹曲线下B形(图6 )的面积。（3）：(3)SB=Σ我=1�（�我-�我-1）（是我+是我+1）2可用基尼指数：(4)遗传算法=1-2\*�乙对于可达性基尼指数，对Y进行逆数据归一化，其余步骤相同。(5)全科医生=1-2\*�乙对于 GEII，我们采用了等式：(6)对可用度进行归一化，计算归一化可用度和可达性的平均值，生成新的综合绿地暴露指数，并根据新指数计算基尼指数，得到GEII。(6)y=（�-�\_米我�）/（�\_米��-�\_米我�）

* 基于基尼系数分析不平等性
* 调控机制分析
* 根据热缓解溢出效率为未来城市规划与管理提供参考建议，从而以最小的代价实现尽可能大的热缓解溢出效应。

## 参考文献

Shi, M., Wang, Y., Lv, H., & Jia, W. (2023). Climate gentrification along with parks' cooling performance in one of China's tropical industrial cities. *Science of The Total Environment*, 164603.

Yan, M., Chen, L., Leng, S., & Sun, R. (2023). Effects of local background climate on urban vegetation cooling and humidification: Variations and thresholds. *Urban Forestry & Urban Greening*, *80*, 127840.

==

* 参考文献
* 图表
* 服务流
* 精细尺度研究
  1. 参考：Differing spatial patterns of the urban heat exposure of elderly populations in two megacities identifies alternate adaptation strategies