# 城市绿地热缓解溢出效应的供需关系及其调控研究

## 项目的立项依据

### 研究意义

【up2024 0308 07:58】

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（黄晓军等，2020；Tuholske et al., 2021；García et al., 2023）。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。

【up2024 0308 21:38】

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，绿地能够降低相邻区域的温度，对周边环境产生积极影响。然而，尽管绿地广泛分布于各大城市，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。

【up2024 0308 22:40】

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。

【up2024 0309 16:35】

因此，有必要将人口密度及其结构特征纳入考量范畴，构建新的指标体系，以便对绿地热缓解溢出效应的供应与城市热缓解需求之间的关系展开量化分析。这将不仅有助于准确识别热缓解的优先区域，更为城市公园的未来规划与管理提供科学参考，进而对推动城市热环境优化、提升居民生活质量具有重要的社会价值。

### 国内外研究进展

【up2024 0307 14:55】

【绿地热缓解溢出效应】【热缓解】

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（Bouketta , 2023）。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，我们将从需求、供应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

#### 1.2.2. 城市热缓解需求

【up2024 0307 15:13】

城市的高温环境对居民的生活、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。此需求可被定义为在高温条件下通过合理的热缓解措施改善城市热环境的需求。因其对城市居民福祉的潜在影响，城市热缓解需求的估算近年来受到了广泛关注。

【up2024 0307 15:31】

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，当温度超出人体可接受的阈值时，会引发对公共健康的潜在威胁。此时，实际温度与个体可接受的最高温度之间的差值可被视为量化热缓解需求的重要指标 (Estoque et al., 2020)。此外，最近记录的极端气候对人类的影响表明，某些人口/社会经济因素加剧了相关健康问题的脆弱性（Trigo et al., 2005）。受高温不利影响的人口规模及其结构特征亦对城市热缓解需求有显著影响。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 et al., 2022）。

【up2024 0307 16:31】

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现显著的空间分异。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，这些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，未能充分考虑湿度等其他气象变量的影响。同时，尽管人口因素在热缓解需求的估算中受到了关注，但对于人口年龄、收入等特征的考虑仍然不足（Chen et al., 2022; Lan et al., 2022）。大量研究采用人口普查数据来估算城市的热暴露状况，然而，人口普查数据主要反映的是居住人口，即夜间的人口分布情况。在大城市地区，由于工作地与居住地的分离，人口分布的昼夜变化显著。因此，单纯依赖人口普查数据难以满足对白天热缓解需求的准确估计。此外，当前的人口普查数据所采用的统计尺度为区县级别，这一尺度在描述人口空间分布时存在局限性，无法精确刻画人口的高精度分布特征。随着手机大数据的应用，我们能够相对便捷地获取到高精度的人口密度及其特征属性的空间分布数据。鉴于此，构建一个综合考虑热舒适度、人口密度及其特征属性的分析框架尤为重要。

#### 1.2.3. 城市绿地热缓解溢出效应的供需关系

【up2024 0307 20:22】

为了深入研究城市生态系统服务的供应与需求之间的关系，研究人员构建了生态系统服务框架（Feng et al, 2022；Wei et al., 2021；柯钦华等，2024）。此框架的核心目标在于建立生态系统功能与过程同人类实际需求之间的联系，以期更全面地理解自然环境对人类居住环境的积极贡献。生态系统服务作为人类直接或间接从生态系统功能中汲取的多元利益，涵盖城市降温、空气净化、固碳能力提升以及室外休闲空间的供给等（Costanza et al., 1997；Cumming et al., 2014；Huang et al., 2023）。然而，目前聚焦于城市热缓解服务供需关系的研究仍显不足。这些研究多采用评分法对供需水平进行定性评估。尽管该方法简便易行，但由于其固有的主观性和粗略性，难以精确揭示供需之间的量化关联。因此，有必要引入更为精确和客观的评估方法来量化供应与需求之间的联系。

【up2024 0307 21:05】

中国城市的公园呈现出多样化的类型划分（Chen et al., 2022）。以杭州的一项研究为例，公园被划分为五大类别：社区公园、综合公园、历史公园、主题公园和生态公园。通过对比分析各类公园的降温效果，他们发现综合公园和生态公园在降温强度上表现突出，而社区公园则在累积降温方面发挥着积极作用（Tian et al., 2023）。此外，不同类型城市公园周边的社会经济状况存在显著差异。例如，社区公园多布局于成熟的建成区内且规模较小，而生态公园则更倾向于分布在城郊地带。因此，各类公园所能提供的热缓解服务及其对居民需求的满足程度可能存在较大差异。目前尚缺乏针对不同类型公园热缓解服务的系统比较分析。

【up2024 0309 16:45】

综上所述，以往研究在评估绿地对周边热环境的影响时，气象变量的选取过于单一，仅以温度作为主要考量，却未将湿度等其他对热舒适有影响的因素纳入分析框架。此外，现有研究在构建量化指标时，未能充分考虑人口密度及其结构特征的影响，特别是在栅格尺度。至于绿地热缓解的供需关系，当前尚缺乏一个能够进行有效量化比较的框架，相关的供需分析只能依赖于简单的0-1评分体系。

【up2024 0309 16:53】

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。通过探究供应与需求之间的关系，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。这一研究路径有助于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

【up2024 0309 17:09】

鉴于以往研究在城市绿地热缓解供需关系的量化分析方面的不足，本研究以修正温湿度指数（Modified Temperature-Humidity Index, MTHI）作为热环境评估的核心指标，通过纳入对人口的密度和结构特征的考虑，建立新的指标体系来分析城市公园的热缓解供应；基于灾害性、暴露性和脆弱性相结合的理论框架，建立一套可量化的绿地热缓解需求的指标体系，并在栅格尺度绘制热缓解需求的空间格局；通过对绿地热缓解溢出效应的供需关系进行量化比较，识别城市热缓解的优先区域，进而为城市公园的规划与管理提供参考依据。

### 研究内容

#### 通过城市热缓解溢出效应的供应

【up2024 0309 14:06】

选定成都城区为研究区域，重点关注城市公园热缓解溢出效应的供应。首先，利用卫星影像提取城市公园的空间分布信息。然后，以MTHI作为热舒适评估指标，基于其随距公园距离的变化计算各公园热缓解溢出效应的有效作用范围，在相应范围内计算局地公园热缓解强度。将所选公园分为5个类型，建立回归模型分析不同类型公园的公园热缓解与周边环境因素之间的相互关系。最后，将局地公园热缓解强度与人口密度数据及其结构特征相结合，以建立新的指标来更全面地理解公园热缓解溢出效应的供应。

#### 城市热缓解需求

【up2024 0309 14:09】

利用Landsat遥感数据，基于MTHI计算城市热舒适的空间格局。同时，通过对手机大数据的收集和分析，获取人口密度及其结构特征（年龄和收入）的空间格局。在此基础上，我们采用灾害性、暴露性与脆弱性相耦合的框架，构建城市热缓解需求评估模型，对城市各区域的热缓解需求进行估算，并分析其空间格局。然后，将热缓解需求与绿地热缓解溢出效应的供应相加，得到无公园背景下的城市热缓解需求，即对应的热缓解潜在需求。

#### 城市热缓解溢出效应的供需关系及其调控

【up2024 0309 14:19】

将绿地热缓解溢出效应的供应与城市热缓解潜在需求进行对比分析，以揭示供需之间的匹配程度。通过热点分析方法，识别城市热缓解需求亏缺的聚集点。同时，采用基尼系数进一步分析城市热缓解需求亏缺的不平等性，量化不同区域之间的差异大小。最后，基于形态学分析，精准识别城市热缓解的优先区域，为制定针对性的热缓解策略提供科学参考。

### 拟解决的关键科学问题

【up2024 0309 18:06】

（1）除了对温度的直接影响外，城市绿地在调节综合温度与湿度影响的热舒适度方面扮演何种角色？其驱动机制又如何？

（2）如何系统地拓展现有热缓解需求评估指标体系，以便将人口结构特征融入其中？对于热缓解需求的空间格局，人口因素所扮演的具体角色是怎样的？

（3）如何构建绿地热缓解供应与需求之间的量化关系？两者之间如何相互作用？绿地热缓解的供应与需求呈现何种平衡或失衡状态？

## 研究方案

【up2024 0309 21:00】

本研究在获取Google Earth卫星影像、Landsat遥感数据和手机大数据的基础上，估算修正温湿度指数（MTHI），分析绿地热缓解溢出效应的空间格局，将其与暴露性因子和脆弱性因子相结合，计算得到绿地热缓解供应，分析其驱动机制；然后，基于灾害性因子、暴露性因子和脆弱性因子相乘建立城市热缓解需求估算模型，并估算热缓解需求的空间格局，分析其驱动机制；最后，分析绿地热缓解的供需关系，利用热点分析和基尼系数对这一量化关系进行深入分析，并识别城市热缓解的优先区域。研究的技术路线如下：

### 3.1 研究区域和公园提取

【up2024 0307 23:10】

本研究选定成都市区作为研究区域。为获取详尽的地理信息，我们从Google Earth平台采集了高分辨率卫星图像，利用人工目视判读方法提取了115个城市公园的边界。此外，使用面向对象的分割和随机森林分类来获取每个公园的土地覆盖信息。这种方法允许引入更多的光谱特征来区分地面物体。本项目使用该方法将公园的土地覆盖类型分为：森林、灌木、草地、水域和不透水面（图XX）。分类准确性基于在每个公园随机选择的若干栅格点的混淆矩阵来验证。

### 3.2. 城市热舒适度的计算

【up2024 0308 09:06】

不适指数（Discomfort Index, DI）（Thom和Bosen，1959）是用于量化评估人体热舒适度的重要指标。该指数通过对温度和湿度的综合考虑，有效地揭示了人体对热环境的敏感程度。该指数的计算公式如下：

【up2024 0308 09:29】

其中，Ta是空气温度（°F），RH是相对湿度（%）。鉴于DI的计算依赖于站点实测的气象数据，难以揭示热舒适度的空间格局，有学者提出了一种基于Landsat遥感数据计算的热舒适度指数，即修正温湿度指数（Modified Temperature-Humidity Index, MTHI）（Feng et al., 2020）。在该指数的计算框架中，地表温度（Land Surface Temperature, LST）被用于替代气温，归一化差异湿度指数（Normalized Difference Moisture Index, NDMI）被用于替代相对湿度。该指数的计算公式如下：

【up2024 0308 09:27】

其中，*NDMI*的计算公式如下：

【up2024 0308 09:29】

其中，*NIR*和*SWIR*分别表示近红外和短波红外波长。而LST的空间分布可通过辐射传输模型计算得到。

### 城市绿地热缓解供应

【up2024 0308 14:05】

城市公园对周边环境的热舒适可造成正面或负面的影响。这里，我们以城市公园降低MTHI的情况为例，对相关的热缓解指标的计算进行解释。具体来说，随着与公园边缘距离的增加，平均MTHI呈现出逐步上升的趋势，直至达到某一特定距离后出现明显的转折，如图XX所示。从公园边缘至这一转折点的空间范围被定义为公园热缓解溢出效应的有效作用范围。值得注意的是，即使在距离公园等距的不同位置，由于土地覆盖类型、三维形态等环境因素的差异，MTHI存在显著的变化。对于位于公园热缓解的有效范围内的任意一点（如图XX中的红点），该点与转折点处的MTHI差值被定义为局地公园热缓解强度（Local Heat Mitigation Intensity, LHMI）。

【up2024 0308 14:53】

本研究将针对各城市公园，系统分析其对周边环境产生的热缓解溢出效应。首先，通过绘制MTHI随与公园距离变化的曲线，划定公园热缓解的有效作用范围，计算对应范围内各栅格单元的局地公园热缓解强度，并绘制其空间格局。然后，将所选择的城市公园分为5个类型：社区公园、综合公园、历史公园、主题公园和生态公园。针对不同类型的城市公园，我们将以局地公园热缓解强度作为因变量，建立一个逐步多元回归模型，以期深入解析环境因素对热缓解的具体影响。根据以往研究结果，公园降温的主要影响因素包括公园的自身特征以及公园周边的环境特征【参考文献】。在确保所需数据可获取的前提下，我们选择以下指标作为潜在影响因素用于分析：

1. 公园自身特征：绿地大小、NDVI和形状指数。
2. 公园周边环境特征：平均建筑高度、容积率、不透水面覆盖率和建筑面积比。

【up2024 0309 10:34】

针对热缓解溢出效应有效作用范围内的各栅格单元，为了估算该效应的社会价值，我们提出了暴露性因子（Exposure Factor, EF）和脆弱性因子（Vulnerability Factor, VF）。其中，EF表示对应区域的人口暴露程度，而VF则被定义为由收入和年龄共同驱动的需求权重。相关指标计算所需的数据拟采用百度地图手机大数据。

【up2024 0308 10:06】

对于EF的评估，我们选用各单元的人口密度作为关键指标。因此，EF的计算公式如下：

其中，*PD*（Population Density）代表人口密度 (人/km2)。

【up2024 0308 10:11】

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VF，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5万元的人口比例（IH5）以及年收入低于5万元的人口比例（IL5）。这里，5万元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 0308 15:30】

针对热缓解溢出效应有效作用范围内的各栅格单元，通过将其局地公园热缓解强度与对应区域的暴露性因子（人口密度）和脆弱性因子相结合，运用以下公式估算对应单元的公园热缓解溢出效应供应值（LMHIsupply）。

【up2024 0308 15:37】

对于每个公园，我们将其热缓解的有效作用范围内的栅格单元的公园热缓解溢出效应供应值进行累加，即可得到对应公园热缓解溢出效应的累积供应值。

### 城市热缓解需求

【up2024 0307 23:53】

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格局进行分析。对于每个单元，灾害性因子（Disaster Factor, DF）被视为人均“需求背景值”。将该因子与暴露性因子EF和脆弱性因子VF相乘，可得到单元内整个群体的需求背景。

【up2024 0308 11:10】

对于每个栅格单元，根据以往研究的参考标准，我们确定了27°C作为触发热缓解需求的临界值（Yao et al., 2023）。当MTHI低于此阈值时，DF值为0，表明对应区域尚未达到需要热缓解的程度。然而，一旦MTHI超过该阈值，DF则通过计算MTHI与该阈值之间的差值来得到。具体的计算公式如下所示：

【up2024 0309 10:55】

通过将DF, EF与VF相乘，可得到对应单元的城市热缓解需求值。对于绿地热缓解溢出效应有效作用范围内的区域，将热缓解需求与绿地热缓解溢出效应的供应值相加，即可得到对应的热缓解潜在需求，即无公园背景下的城市热缓解需求。潜在

### 城市热缓解溢出效应的供需关系及其调控分析

【up2024 0309 11:19】

通过将绿地热缓解溢出效应的供应量与城市热缓解潜在需求进行对比分析，即可求得当前的绿地热缓解供应对潜在需求的满足程度。我们将上述两者之比定义为绿地热缓解需求满足比，两者之差则被定义为城市热缓解需求亏缺。基于成都市的热缓解需求亏缺状况，本研究将开展以下分析。

（1）热点分析

【up2024 0308 16:05】

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。在热点分析方法中，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∗的计算公式如下（ESRI, 2016）：

【up2024 0308 16:20】

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

【up2024 0308 16:29】

Gi\*统计值的输出是z分数。较高的正z分数表示高值（热点）的聚集度更高，较低的负z分数表示低值（冷点）的聚集度更高。

（2）绿地热缓解需求亏缺的不平等性分析

【up2024 0308 17:28】

在经济学领域中，基尼指数通常用于不平等性的分析（Gastwirth，1972）。对于本项目而言，基尼指数被用于评估城市热缓解需求亏缺的不平等性。基尼指数被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。其中，洛伦兹曲线是特定指标（如财富）按人口百分比的累积分布函数的图形表示。该指数的范围在0-1之间，值越低表示越公平。基尼指数的计算公式如下：

【up2024 0308 17:52】

其中，Pi是研究区域内居民数量的累积百分比，而Ai是城市热缓解需求亏缺的累积百分比。

1. 城市热缓解优先区域的识别

【up2024 0308 20:35】

针对绿地热缓解需求亏缺的空间格局，本研究采用百分位数法对其进行分段，具体划分为高需求、中需求和低需求三大区域。对于高需求区域，我们进一步开展形态空间格局分析。

【up2024 0308 20:47】

本研究采用GUIDOS工具箱对图像进行形态学分析，将其划分为七种形态类型，即“核心”、“桥”、“岛屿”、“环”、“边缘”、“孔”和“分支”。其中，“核心”、“桥”、“边缘”和“分支”被视为热传播网络中的关键类型。具体而言，“核心”区域具有较高的受热值，是热量聚集的重要节点，而“桥”则扮演着连接不同高受热值区域的关键角色。此外，“边缘”和“分支”则代表了热风险扩散的潜在区域（Xie et al., 2015）。

【up2024 0308 21:16】

借助ArcGIS中的Linkage Mapper工具，运用电路理论模拟潜在的绿色走廊，旨在构建高效的城市热缓解网络。通过将该绿色走廊与热缓解高需求区中的“核心”、“桥”、“边缘”和“分支”类型区域进行叠加分析，识别城市热缓解优先区域。这些优先区域在未来的城市规划与管理中具有重要的参考价值，有助于以最小的成本实现热缓解的最大化。

【up2024 0308 21:19】

针对热缓解优先区域内需要额外增设的公园，本研究将依据局地公园热缓解强度与环境因素之间的回归模型，进一步量化在这些特定区域增设公园后对热缓解亏缺的改善程度。

## 参考文献

黄晓军, 王博, 刘萌萌, 郭禹慧, & 李艳雨. (2020). 中国城市高温特征及社会脆弱性评价. 地理研究, 39(7).

文慧,彭立华,殷实,冯宁叶, &凌子尧. (2023).城市绿地热效应全年变化特征及其与背景气象因子的关系. 生态学报, 43(19).

柯钦华,周俏薇,庄宝怡, &孙传谆. (2024).基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建研究, 05

Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C., Verdin, A., Sweeney, S., Grace, K., ... & Evans, T. (2021). Global urban population exposure to extreme heat. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(41), e2024792118.

García, D. H., & Rezapouraghdam, H. (2023). Climate change, heat stress and the analysis of its space-time variability in European metropolises. Journal of Cleaner Production, 425, 138892.

Pascal, M., Goria, S., Wagner, V., Sabastia, M., Guillet, A., Cordeau, E., ... & Host, S. (2021). Greening is a promising but likely insufficient adaptation strategy to limit the health impacts of extreme heat. Environment international, 151, 106441.

Liu L., He H., Cai Y., Hang J., Liu J., Liu L., Jiang P., & He H. (2023). Cooling effects of wetland parks in hot and humid areas based on remote sensing images and local climate zone scheme. Building and Environment, 243, 110660

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.

Bouketta, S. (2023). Urban Cool Island as a sustainable passive cooling strategy of urban spaces under summer conditions in Mediterranean climate. Sustainable Cities and Society, 99, 104956.

Yin, S., Peng, L. L., Feng, N., Wen, H., Ling, Z., Yang, X., & Dong, L. (2022). Spatial-temporal pattern in the cooling effect of a large urban forest and the factors driving it. Building and Environment, 209, 108676.

Estoque, R. C., Ooba, M., Seposo, X. T., Togawa, T., Hijioka, Y., Takahashi, K., & Nakamura, S. (2020). Heat health risk assessment in Philippine cities using remotely sensed data and social-ecological indicators. Nature communications, 11(1), 1581.

Trigo, R. M., García‐Herrera, R., Díaz, J., Trigo, I. F., & Valente, M. A. (2005). How exceptional was the early August 2003 heatwave in France?. Geophysical research letters, 32(10).

Coates, L., van Leeuwen, J., Browning, S., Gissing, A., Bratchell, J., & Avci, A. (2022). Heatwave fatalities in Australia, 2001–2018: an analysis of coronial records. International Journal of Disaster Risk Reduction, 67, 102671.

任宇,冯曦兮,杨书,唐景霞,徐帆,孔翔瑜... 潘琰.(2020).绵阳市日平均气温与居民非意外死亡的时间序列分析.中国卫生统计(02),239-242.

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.

Feng, L., Liu, Y., Zhou, Y., & Yang, S. (2022). A UAV-derived thermal infrared remote sensing three-temperature model and estimation of various vegetation evapotranspiration in urban micro-environments. Urban Forestry & Urban Greening, 69, 127495.

Wei, J., & Zhu, W. (2021). An operational parameterization scheme of surface temperature-vegetation index contextual model for large-scale temporally continuous evapotranspiration estimation: The case study of contiguous United States. Journal of Hydrology, 602, 126805.

Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. nature, 387(6630), 253-260.

Tian, P., Li, J., Pu, R., Cao, L., Liu, Y., & Zhang, H. (2023). Assessing the cold island effect of urban parks in metropolitan cores: a case study of Hangzhou, China. Environmental Science and Pollution Research, 1-14.

Tan, X., Sun, X., Huang, C., Yuan, Y., & Hou, D. (2021). Comparison of cooling effect between green space and water body. Sustainable Cities and Society, 67, 102711.

Shi, M., Chen, M., Jia, W., Du, C., & Wang, Y. (2023). Cooling effect and cooling accessibility of urban parks during hot summers in China's largest sustainability experiment. Sustainable Cities and Society, 93, 104519.

Lan, T., Liu, Y., Huang, G., Corcoran, J., & Peng, J. (2022). Urban green space and cooling services: Opposing changes of integrated accessibility and social equity along with urbanization. Sustainable Cities and Society, 84, 104005.

Zhang, X., Lei, Y., Li, R., Ackerman, A., Guo, N., Li, Y., ... & Liu, Y. (2022). Research on thermal comfort of underside of street tree based on LiDAR point cloud model. Forests, 13(7), 1086.

Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. Urban forestry & urban greening, 49, 126630.

Chen, B., Xie, M., Feng, Q., Wu, R., & Jiang, L. (2022). Diurnal heat exposure risk mapping and related governance zoning: A case study of Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, *81*, 103831.

Ca, V. T., Asaeda, T., & Abu, E. M. (1998). Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and buildings*, *29*(1), 83-92.

Macintyre, H. L., Heaviside, C., Taylor, J., Picetti, R., Symonds, P., Cai, X. M., & Vardoulakis, S. (2018). Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves–Implications for health protection. *Science of the total environment*, *610*, 678-690.

Dronova, I., Friedman, M., McRae, I., Kong, F., & Yin, H. (2018). Spatio-temporal non-uniformity of urban park greenness and thermal characteristics in a semi-arid region. *Urban forestry & urban greening*, *34*, 44-54.

Liu, S., Zhao, J., Xu, M., & Ahmadian, E. (2021). Effects of landscape patterns on the summer microclimate and human comfort in urban squares in China. *Sustainable Cities and Society*, *73*, 103099.

Fan, H., Yu, Z., Yang, G., Liu, T. Y., Liu, T. Y., Hung, C. H., & Vejre, H. (2019). How to cool hot-humid (Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, *265*, 338-348.

Yuan, B., Zhou, L., Dang, X., Sun, D., Hu, F., & Mu, H. (2021). Separate and combined effects of 3D building features and urban green space on land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, *295*, 113116.

Du, C., Jia, W., Chen, M., Yan, L., & Wang, K. (2022). How can urban parks be planned to maximize cooling effect in hot extremes? Linking maximum and accumulative perspectives. Journal of environmental management, 317, 115346.

Li, Y., Ren, C., Ho, J. Y. E., & Shi, Y. (2023). Landscape metrics in assessing how the configuration of urban green spaces affects their cooling effect: A systematic review of empirical studies. *Landscape and Urban Planning*, *239*, 104842.

Das, D. N., Chakraborti, S., Saha, G., Banerjee, A., & Singh, D. (2020). Analysing the dynamic relationship of land surface temperature and landuse pattern: A city level analysis of two climatic regions in India. *City and Environment Interactions*, *8*, 100046.

Li, Y., Fan, S., Li, K., Zhang, Y., Kong, L., Xie, Y., & Dong, L. (2021). Large urban parks summertime cool and wet island intensity and its influencing factors in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, *65*, 127375.

Chen, M., Jia, W., Yan, L., Du, C., & Wang, K. (2022). Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity. Journal of Cleaner Production, 334, 130252.

Cumming, G. S., Buerkert, A., Hoffmann, E. M., Schlecht, E., von Cramon-Taubadel, S., & Tscharntke, T. (2014). Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services. *Nature*, *515*(7525), 50-57.

Huang, Y., Ma, R., Zhou, W., Yuan, Y., Ren, J., & Cao, Y. (2023). Risk assessment and regulation between the supply and demand of ecological products: A comprehensive framework and case study. *Ecological Indicators*, *154*, 110617.

Thom, E. C. (1959). The discomfort index. Weatherwise, 12(2), 57-61.

Feng, L., Zhao, M., Zhou, Y., Zhu, L., & Tian, H. (2020). The seasonal and annual impacts of landscape patterns on the urban thermal comfort using Landsat. Ecological Indicators, 110, 105798.

Yao, L., Sailor, D. J., Yang, X., Xu, G., & Zhao, L. (2023). Are water bodies effective for urban heat mitigation? Evidence from field studies of urban lakes in two humid subtropical cities. Building and Environment, 245, 110860.

Gastwirth, J. L. (1972). The estimation of the Lorenz curve and Gini index. The review of economics and statistics, 306-316.

Xie, M., Gao, Y., Cao, Y., Breuste, J., Fu, M., & Tong, D. (2015). Dynamics and temperature regulation function of urban green connectivity. *Journal of Urban Planning and Development*, *141*(3), A5014008.

* 服务流

参考：Differing spatial patterns of the urban heat exposure of elderly populations in two megacities identifies alternate adaptation strategies