王敏，孙慧怡，余谦益，汪洁琼．基于深度学习的城市绿地生境精细化识别与降温效应优选设计：以环太湖地区为例[J]．风景园林，2026，33（3）：51-61．

基于深度学习的城市绿地生境精细化识别与降温效应优选设计——以环太湖地区为例

王敏　孙慧怡　余谦益　汪洁琼*

摘要：【目的】城市绿地为缓解热岛效应提供近自然途径，城市绿地的降温效应受生境特征与生境类型差异影响，有必要类型化揭示城市绿地生境特征对于降温效应的影响规律。【方法】引入 U-Net 网络架构，结合高分辨率遥感影像，对环太湖地区 25 983 个研究单元的生境要素进行大批量自动化识别，用 K 均值（K-means）聚类算法进行生境类型细分，使用交叉分析法揭示不同生境类型的降温效应差异及其关键影响因子。【结果】共识别出 6 类一级、39 类二级绿地生境类型；一级生境类型降温效应总体排序为林地型生境 > 滨水复合型生境 > 植被复合型生境 > 农田复合型生境 > 草地型生境 > 硬质型生境；不同绿地生境类型的降温效应和关键影响因子存在差异，并呈现一定的城乡差别。【结论】深度学习模型可辅助实现城市绿地生境要素的精细化识别与类型细分，所揭示的降温效应差异化规律有力支撑了绿地生境的优选设计策略，为城市绿地实现气候适应型近自然生态修复提供了参考。

关键词：风景园林；生境类型；降温效应；U-Net 网络架构；交叉分析；环太湖地区

基金项目：国家自然科学基金面上项目“城市绿地增汇减碳的生态系统服务耦联机制、绩效评价与格局优化”（编号 32572129）；国家自然科学基金面上项目“基于多重价值协同的城市绿地空间格局优化机制：以上海大都市圈为例”（编号 52178053）；2024 年度上海高校市级重点课程建设项目“景观详细规划”

中图分类号：TU985　　**文章编号：**1673-1530(2026)03-0051-11　　**收稿日期：**2025-10-29

文献标识码：A　　**DOI：**10.3724/j.fjyl.LA20250674　　**修回日期：**2026-01-27

文章亮点：

1、构建了一套可迁移的智能技术方法，用于生境类型精细化制图和分类。该方法融合 U-Net 网络架构和高分辨率遥感影像，实现环太湖地区绿地生境要素精细化识别和生境类型细分。

2、运用交叉分析法，定量揭示不同生境类型的降温效应差异及其关键影响因子，为制定绿地降温策略提供科学依据。

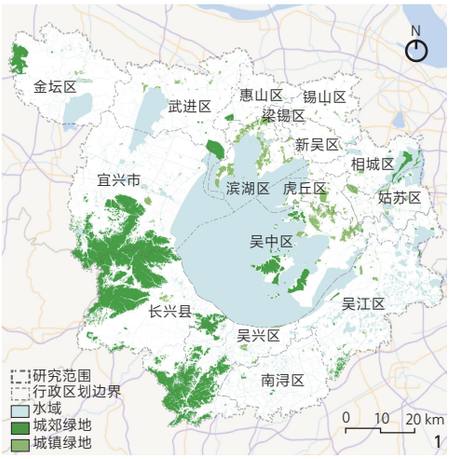
3、从导控、优选、设计 3 个层面，提出以降温效应为导向，与绿地类型相适配生境类型的系统性优化路径与设计指引。

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次评估报告指出，城市热暴露风险正以年均 3.2% 的速率递增，极端高温事件和热岛效应加剧[1]，直接影响居民健康和热舒适度。大量实证研究表明，城市绿地能为缓解城市热岛效应提供近自然途径[2-3]，城市绿地通过植物的光合作用和蒸腾作用，以及吸收、隔离、阻挡等机制实现降温增湿[4]。2010 年来，有关城市绿地降温效应的研究多集中在绿地规模[5]、布局结构[6]、形态特征[7]，植物群落结构[8] 和植被规模[9] 等方面。这些空间指标虽然能反映景观的整体特征，却忽视了城市绿地不同要素组合在调节微环境方面的差异性。已有研究表明，包含不同景观元素的绿地降温强度不同[10]，绿地通过差异化的地形和植被等要素，调节水热条件和空气流动，进而影响区域温度[11]，尤其能对极端温度产生缓冲作用。

美国生态学家福尔曼（R. Forman）将生境范畴拓展为“特定尺度下环境条件均一的景观单元”，强调微环境和生物群落的特定匹配关系[12]。在高速城镇化进程下，人为干扰使城市绿地呈现较强的生态异质性，具有复杂的生境特征并形成丰富的生境类型[13]。因此有必要进一步从生境视角深入解析绿地不同要素组合的异质性特征和降温效应差异。研究表明，城市绿地的生境特征和生境质量与生态系统服务功能密切相关[14]，诸多学者分别针对城市湿地生境[15]、滨水生境[16]、石漠化生境[17] 等单一类型生境进行降温能力探索，但鲜少研究系统梳理并比较城市绿地多类型生境的降温效应及差异性。当前城市绿地建设已进入提质增效和精细化管理阶段，有必要探索并比较不同绿地生境类型的降温能力，形成生境设计优选导则，为响应气候变化的近自然生态修复设计提供类型化指导与技术支持。

为了系统探讨城市不同生境类型的降温效应，亟待突破的一个技术难点在于对生境进行大批量、高精度的调研与类型划分。传统的实地观测、数字模拟等方法，虽能实现高精度和长时序详细记录实测[18-19]，但存在大规模数据采集难度大、易受场地是否可达以及现场调研可能产生人为生态干扰等问题影响。借助常规遥感影像解译方法[6, 20] 进行生境类型或生境单元制图，范围虽能扩大至中观、宏观尺度，但人工解译耗时费力、分割精度效果欠佳[21]。为此，近年来学者们开始尝试在遥感影像解译过程中引入深度学习（deep learning）模型。作为机器学习的重要分支，深度学习模型擅长捕捉图像中复杂的光谱、纹理，智能提取潜在特征和上下文信息，能显著提高遥感影像的分类精度和自动化程度[22]，目前已在地物提取[23-24]、土地覆盖制图[25]、景观特征识别[26]等方面进行实际应用。其中，U-Net 是一种基于深度学习、最常用、最简单的网络架构，广泛应用于图像语义分割。该网络架构能利用更多的细节特征实现像素级精确分类[27]，已在耕地识别[28]、土地覆

©Beijing *Landscape Architecture* Journal Periodical Office Co., Ltd. Published by *Landscape Architecture* Journal. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.



1 研究范围和城市绿地研究样本分布

Research scope and distribution of urban green space study samples

被分类[29]、城市绿地分类[30]等识别领域表现出显著优势，为大规模生境类型的精准提取提供了技术基础。

基于此，本研究引入 U-Net 网络架构，结合高分辨率遥感影像，选择环太湖地区展开实证研究，搭建 U-Net 网络架构与高分辨率遥感影像结合的绿地生境要素智能识别模型，通过 k 均值（K-means）聚类算法实现生境类型细分，再采用交叉分析法定量评估和比较不同生境类型的降温效应差异和影响降温能力的关键因子，旨在以细分生境类型为切入点，进一步细化探索城市绿地不同要素组合的降温效应差异，并提出针对性的生境优选设计导则，为气候适应型城市绿地生态精准修复提供支撑。

1 研究对象和数据收集

1.1 研究对象

研究区域为长三角环太湖地区（30°36′~31°53′N、119°18′~120°54′E），参考《上海大都市圈空间协同规划》中界定的环太湖战略协同区[31]，包含苏州、无锡、常州、湖州 4 个城市（下辖 16 个县级行政单元），面积约 1.30 万 km^2。该区域以太湖为核心，河网密集、湖泊众多，城市绿地类型多样，蕴含多种生境。自 2000 年以来，由于城市化建设，该区域年均气温、最高气温显著增高，夏季极端高温区域连片分布。因此，城市生态修复过程中如何优化生境类型配置，提升绿地降温效应，是环太湖地区建设生态宜居城市的重要探索。

本研究以城市绿地为研究对象。根据 CJJ/T 85—2017《城市绿地分类标准》，选择公园绿地（G1）、防护绿地（G2）、广场用地（G3）、区域绿地（EG）4 个绿地类别进行研究。总体来看，城市绿地的空间分异特征显著，城市绿地沿太湖、四周山体呈大块集聚分布，建成区内以小块、分散式公园绿地为主，且城乡梯度分布明晰。为了保证绿地生境功能的稳定性，本研究筛选出面积大于 2.5 hm^2 的城市绿地，共计 508 个绿地研究样本，其中城镇绿地 383 个、城郊绿地 125 个（图 1）。为精细识别绿地生境特征，进一步基于绿地样本的遥感影像数据（卫星瓦片），布设 300 m×300 m 网格，共得到 25 983 个研究单元。

1.2 数据收集与预处理

本研究用到的数据包括地理信息数据和地表温度数据。其中地理信息数据涵盖绿地矢量数据、遥感影像数据、高程数据和行政区划数据。绿地矢量数据通过 OpenStreetMap 平台获取（www.openstreetmap.org），采用人工目视解译并对照卫星地图进行手动修正。对于遥感影像数据，统计对比研究区域 2016—2024 年的卫星瓦片，发现 2022 年影像数据在时间覆盖上占比最高且数据完整性最好；进一步对比四季地表温度反演结果，发现环太湖地区夏季的热环境特征和绿地降温效应最为显著，因此本研究的卫星瓦片以 2022 年夏季为主，采用 18 级 WGS84 无偏移 Google Earth 卫星地图数据产品（分辨率为 1.190 9 m/像素）。该数据来源于美国 DigitalGlobe 公司的捷鸟（QuickBird）商业卫星与 EarthSat 公司（earthsat.com）提供的混合数据源。由于部分地区在特定时间可能没有卫星经过而导致数据缺失，研究过程中选择邻近日期的卫星瓦片对缺失数据进行筛选替换。高程数据使用 Google Earth 数字高程模型（digital elevation model, DEM），分辨率为 10 m；行政区划数据为 2024 年省市县三级行政区划矢量数据，数据来源于天地图，审图号为 GS〔2024〕0650。

地表温度（land surface temperature, LST）数据来源于 Google Earth Engine 开源遥感数据云计算平台，获取了美国地质调查局（U.S. Geological Survey, USGS）发布的 Landsat 8 Level 2 Collection 2 Tier 1 数据集（简称 Landsat 数据集）中的地表温度数据，该数据在发布前已经过全球范围内的站点实测验证，其均方根误差（root mean square error, RMSE）通常控制在 1~2 ℃。通过对 Landsat 数据集进行筛选，发现 2022 年 7 月的典型高温日遥感数据普遍云量较低，数据具有代表性，因此采用该时段 30 m 分辨率的地表温度反演数据，并对栅格数据的缺失值进行差值填补，最终得到完整的地表温度数据。

2 研究方法

2.1 基于深度学习构建城市绿地生境要素智能识别模型

本研究采用 U-Net 网络架构构建绿地生境要素智能识别模型。为提升图像分割精度和泛化能力，目前大量研究在 U-Net 网络架构的编辑器中加入简单模块，如引入修正线性单元（rectified linear unit, ReLU）[32]、残差网络（residual network, ResNet）、门控注意力机制[33]等。其中，残差网络变体 ResNet50 模型训练难度较低，模型稳定性较高，且在训练过程中能更好地保留图像原始信息，提高了特征提取的准确性和鲁棒性。考虑到本研究的尺度、数据特征等因素，兼顾模型分割性能与效率，最终选用 ResNet50 与 U-Net 一起作为 U-Net-ResNet50 智能识别模型的主干训练网络。

构建智能识别模型主要包括 4 个步骤（图 2）。首先，以 508 个绿地样本共 25 983 个卫星瓦片作为模型数据库。其次，参照相关生境类型划分思路[34-35]，分析 508 个城市绿地样本的生境要素构成特征，本研究明确 1 种人工生境要素和 10 种自然生境要素为人工标注和语义分割识别对象：硬质广场（简称 BG）、密林（简称 CL）、疏林（简称 PC）、灌丛（简称 PCS）、半开敞草坪（简称 PO）、开敞草

坪（简称 O）、水体（简称 W）、集约农田（简称 CR）、传统农田（简称 TE）、圩田（简称 PF）和茶园（简称 S）。对包含上述生境要素类型的局部卫星瓦片进行人工标注，作为有监督学习模型训练的基础数据集，待模型训练与优化后，再运用有监督模型对其他区域卫星瓦片图像的生境要素进行标注，最终制作成 U-Net-ResNet50 智能识别模型所需的训练和测试数据集。然后，采用 PyTorch 框架搭建以 ResNet50 作为训练网络的 U-Net 语义分割平台，输入准备好的训练集数据进行训练，设定损失函数用来评估模型的鲁棒性，待训练完成，模型达到较好的稳定性和一致性，进一步输入测试集数据，评估模型的识别准确性。U-Net-ResNet50 智能识别模型各评价指标计算结果如下：平均交并比（mean intersection over union, mIoU）为 83.95%，平均像素精度（mean pixel accuracy, mPA）为 94.59%，平均精确率（mean precision, mPrecision）为 88.41%，平均召回率（mean recall, mRecall）为 94.59%。训练结果达到预期目标，进一步与实地调研的生境要素现状进行比对，证明模型可信。最后，将已训练并验证的可信模型用于环太湖地区，向模型中输入采样的 25 983 张卫星瓦片，对卫星瓦片中 11 种生境基本要素进行识别与分割，得到批量输出的图像语言分割结果。

2.2 基于K–means 聚类算法划分城市绿地生境类型

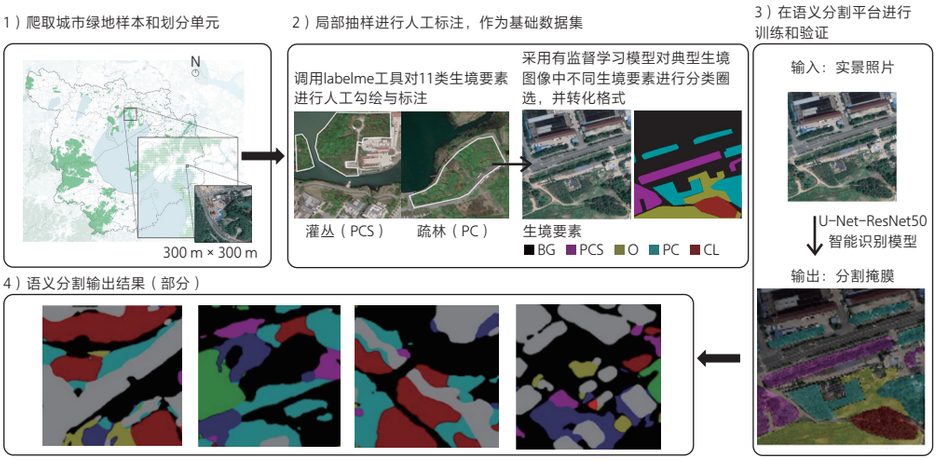
K-means 聚类算法是一种常用的无监督学习算法，能有效挖掘大规模数据中的潜在结构，将数据集样本自动划分为不同的簇[36]。本研究基于深度学习模型识别的 11 种生境要素，计算各生境要素在单元中的面积占比，并结合归一化平均海拔高程、平均坡度的地形地貌特征以及城乡分布区位，对生境要素进行聚类，对城市绿地生境类型进行细分。

2.3 降温效应指标选取与测算

LST 是绿地通过蒸散发与遮阴机制调节微气候的直接体现。本研究选取地表平均温度和地表最高温度作为量化绿地降温效应的关键指标[37]。其中，地表平均温度用于衡量空间单元的整体降温效应，关注空间范围内平均温度的降低。而地表最高温度表征空间单元局部高温缓解能力，主要评估空间单元内高温区域温度调节效果。地表平均温度（T_{mean}）的计算式

$$T_{mean} = \sum_{i}^{n} T_i / n$$

式中，T_i 是生境单元内第 i 个像元的地表温度，n 是像元总数。



2 生境要素智能识别过程

Intelligent recognition process of biotope elements

2.4 基于交叉分析法揭示城市绿地不同生境类型的降温效应

交叉分析法通常用于研究和展示 2 个及以上分类变量之间的关系，通过比较各项数值的分布，识别变量间的潜在关联，能为后续的统计推断提供初步方向和依据。本研究将 25 983 个生境单元按照不同生境类型进行分组，运用交叉分析法，揭示生境类型对绿地整体降温效应与局部高温缓解能力的影响规律，并结合生境单元的城乡空间分布情况，确定降温效应最优生境组合。

3 结果与分析

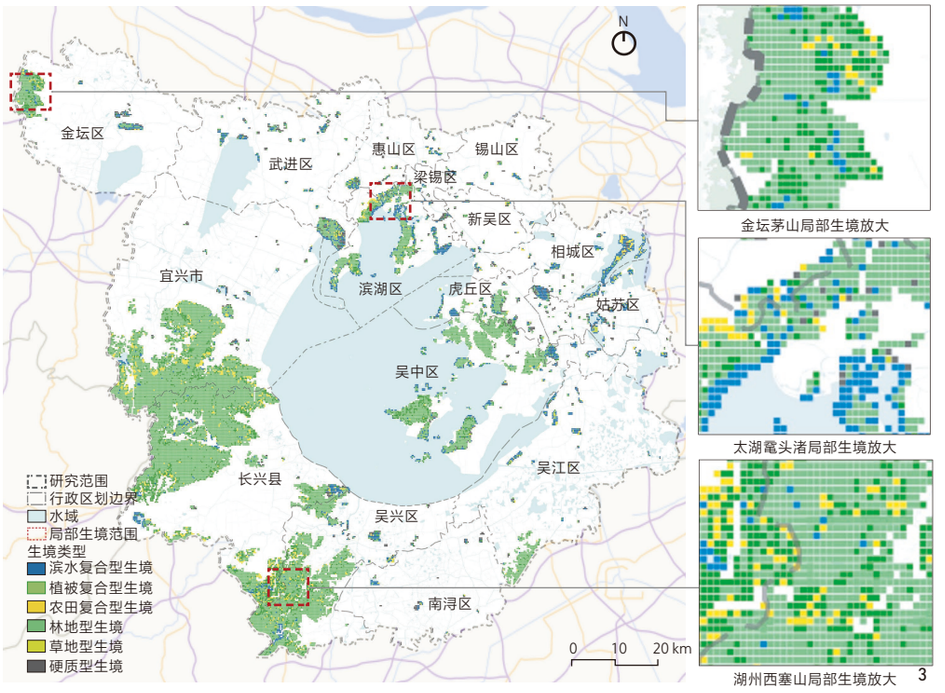
3.1 环太湖地区生境类型识别和空间分布

基于 K-means 聚类结果，识别出 6 种一级生境类型、39 种二级生境类型。一级生境类型包括硬质型生境、草地型生境、林地型生境、植被复合型生境、滨水复合型生境及农田复合型生境。二级生境类型包括：硬质型和草地型生境各 1 种，7 种林地型生境，9 种植被复合型生境，10 种滨水复合型生境，11 种农田复合型生境（表 1）。多项研究表明，以不透水面覆盖度为主要表征的城镇建设强度影响生境的气候调节功能，如 Arnold 等认为不透水面覆盖度低于 30% 时，生境能保持较好的自然水文和气候调节功能[38]，Stewart 等基于局部气候分区（local climate zone, LCZ）的分类逻辑，发现在高强度城市开发背景下，50% 的硬化率通常是人工干扰程度由中等强度向高强度转化的关键阈值[39]。因此，本研究进一步以不透水面覆盖度表征建设强度，对一级生境类型进行细分，≥50% 为高密度生境，共 7 种；30%~＜50% 为中密度生境，共 13 种；小于 30% 为低密度生境，共 19 种。对单一生境的类型细分，若某一种生境要素（硬质广场除外）占比超过 50%，则该生境要素为主导生境要素，生境类型以该生境要素命名。对复合型生境的命名，若有 2~3 种生境要素占比均超过 30%，即优势生境要素，生境组合名称按“地形—乔—灌—草—茶园”的顺序进行命名，若生境要素属于乔、灌、草中的同类，如“密林”与“疏林”，则整合为“混合林”；生境单元最终命名格式为“建设强度-绿地生境组合名称-（茶园生境组合名称）-（滨水/农田）-生境”，如“低密度陡坡混合林生境”“中密度混合林草地滨水生境”“低密度缓坡混合林茶园生境”“低密度密林茶园传统农田生境”等。

表1 环太湖地区城市绿地生境类型智能识别结果与分类体系

Tab. 1 Intelligent identification results and classification system of urban green space biotopes in Around Taihu Lake region

一级生境类型	二级生境类型		
	高密度生境	中密度生境	低密度生境
硬质型生境	硬质广场生境		
草地型生境	开敞草地生境		
林地型生境	疏林生境 密林生境	密林生境 缓坡密林生境	缓坡密林生境 密林生境 陡坡密林生境
植被复合型生境	混合林生境 疏林半开敞草地生境	缓坡密林开敞草地生境 混合林半开敞草地生境 混合林生境	陡坡混合林生境 缓坡密林灌丛生境 混合林半开敞草地生境 缓坡混合林茶园生境
滨水复合型生境	开敞草地滨水生境	密林滨水生境 密林开敞草地滨水生境 混合林草地滨水生境 灌丛滨水生境 半开敞草地滨水生境	湿地生境 缓坡密林茶园滨水生境 疏林滨水生境 圩田滨水生境
农田复合型生境	传统农田生境	密林集约农田生境 开敞草地传统农田生境	密林半开敞草地传统农田生境 缓坡密林灌丛传统农田生境 密林茶园传统农田生境 密林传统农田生境 混合林传统农田生境 缓坡密林传统农田生境 陡坡密林传统农田生境 传统农田生境



3 一级生境类型空间分布

Spatial distribution of primary biotope types

一级生境类型中，林地型生境单元数量占比 66%，主要分布在大型山体、中小型山脉密集区域和城市或村镇建设边缘区域；植被复合型生境单元数量约占 14%，主要分布在山体边缘与建设区交接地带；滨水复合型生境约占 10%，主要沿太湖及内陆湿地呈线状分布；农田复合型生境约占 5%，破碎化及异质化程度高，与各种植被类型均有复合，越靠近城郊农田复合类型越丰富；硬质型生境约占总体的 4.5%，主要分布于高密度城市中心区的中小型绿地斑块内；草地型生境仅占 0.5%，主要分布于阳澄湖半岛旅游度假区、金鸡湖高尔夫俱乐部等大型高尔夫球场区（图 3）。

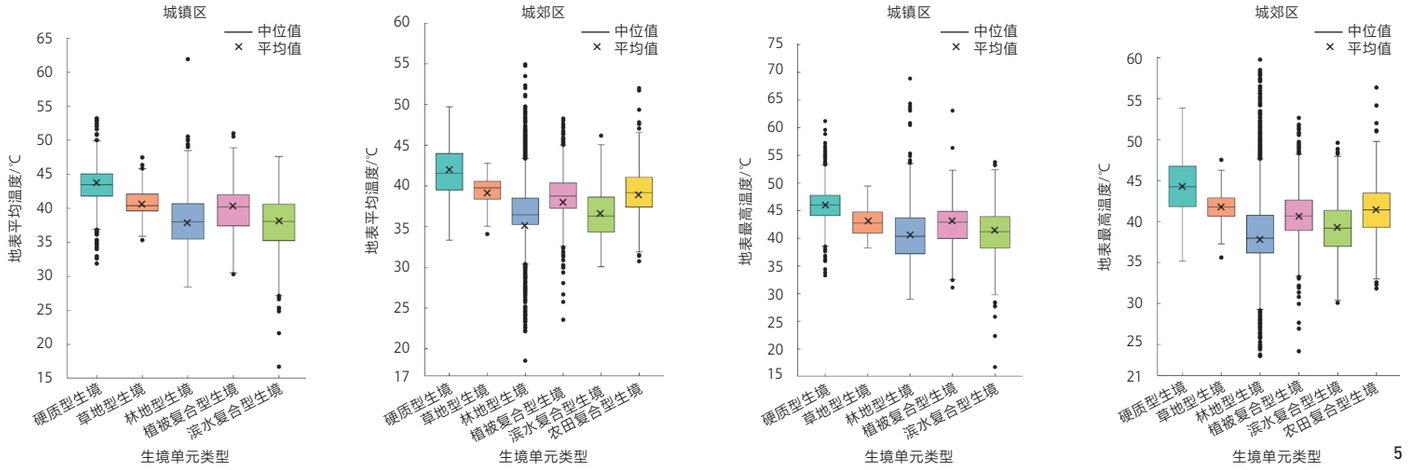
3.2 城市绿地生境单元热环境特征

统计各生境单元的地表平均温度和地表最高温度，去除异常极大值和极小值，以自然断点法分为 5 级（图 4）。结果显示，生境单元地表平均温度均值为 37.81 ℃，地表平均温度较高区域主要集中在小型绿地斑块，虎丘区、吴中区、姑苏区及相城区中型绿地斑块边界，以及宜兴市宜溧山地和吴兴区金盖山北部城镇交界处；地表最高温度均值为 39.81 ℃，空间分布特征与地表平均温度基本一致。

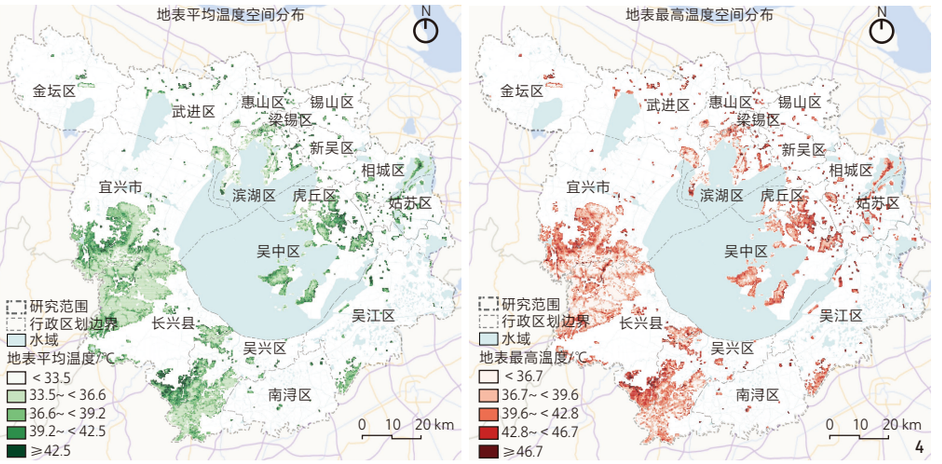
3.3 城市绿地生境类型的降温效应差异分析

3.3.1 生境类型降温效应总体分析

交叉分析结果显示，一级生境类型降温能力呈现显著差异性，从高到低依次为林地型生境、滨水复合型生境、植被复合型生境、农田复合型生境、草地型生境、硬质型生境。其中，林地型生境通过乔木冠层遮阴与蒸腾作用形成高效降温基底，滨水复合型生境依赖水体蒸发与水-陆热量交换紧随其后；而单一人工化的草地型与硬质型生境温度调节能力最弱。比较各生境类型的地表平均温度和地表最高温度的波动情况，发现草地型生境的温度数据分布最为集中，波动较小，说明要素相对单一的生境在调节整体温度和缓解局部高温方面的作用较为稳定。滨水复合型和植被复合型生境的温度数据离散程度较大，推测原因主要为复合型生境在具体要素的三维构成上多样性较高，例如在滨水复合型生境中，滨水岸带组合类型的多样性以及其他环境因子等多重因素均可能影响降温效应表现，植被复合型生境则容易受到不同植被群落结构的影响。此外，林地型生境受海拔、坡度、坡向等地形地貌特征影响，降温效应也呈现较为明显的差异。城乡对比显示，城郊区生境单元的温度稳定性显著优于城镇区，尤其在林地型与植被复合型生境中，温度波



5



4

4 环太湖地区城市绿地生境热环境空间分布
Spatial distribution of thermal environment of urban green space biotopes in Around Taihu Lake region

5 一级生境类型降温效应的城乡差异交叉分析
Cross analysis of urban-rural differences in cooling effects of primary biotope types

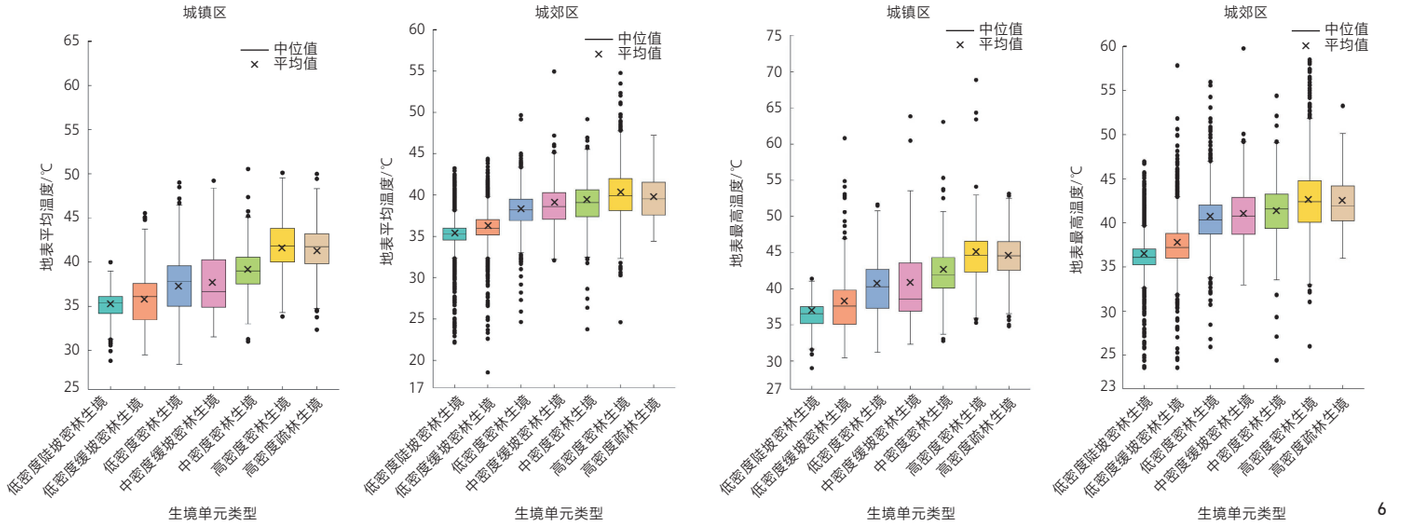
动范围较城镇区缩小 20%~30%，这可归因于城郊区生境自然化程度高、人为干扰少，生态系统结构完整，有助于形成连续冷岛效应，因此具备更强的自我调节韧性。而城镇区受高强度人类活动干扰，绿地生境斑块多呈孤岛化、破碎化，降温效应易受周边热环境影响，因此导致热环境波动更为显著（图 5）。

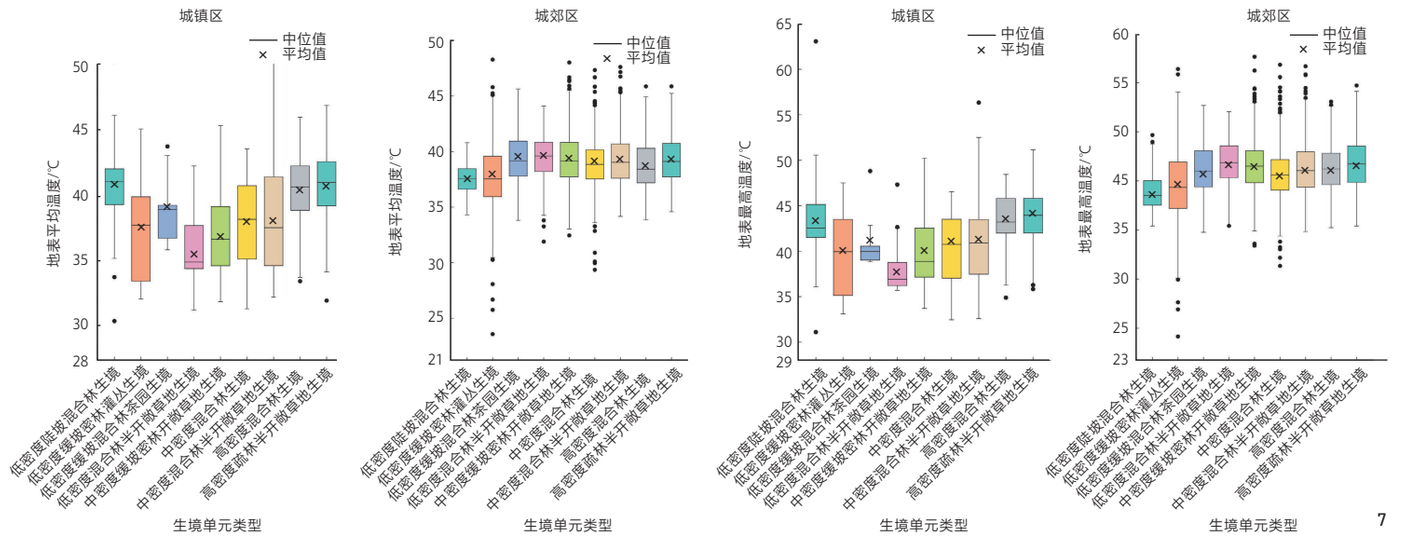
3.3.2 生境类型降温效应的关键影响因子

基于二级生境类型与热环境特征的交叉分析结果，通过比较箱形图平均值，发现林地型生境的降温效应受地形条件影响显著（图 6）。坡度越陡的生境在城镇区低密度区域降温效果越突出，如低密度陡坡密林生境比低密度缓坡密林生境地表最高温度低近 1 ℃。而单纯的林分要素对林地型生境单元热环境特征的影响较弱，高密度疏林生境比高密度密林生境的地表平均温度和最高温度均略低，在城镇高密度区中仅相差 0.1 ℃，在城郊区相差近 0.5 ℃。这种显著差异反映出林地与地形间的协同降温作用，可能由于地形坡度促进空间对流，从而加强热交换效应。

植被复合型生境类型中，城镇区的地表平均温度和最高温度普遍高于城郊区（图 7）。在城镇区，低密度混合林半开敞草地生境和中密度缓坡密林开敞草地生境的降温能力最优，二者均为林地配合开敞草地的多层植被结构。高层林地利用叶片蒸腾降低温度与冠层遮挡减少太阳辐射，底层开敞草坪则有利于通风散热，表明植被结构是影响降温效应的关键因素。值得一提的是，植被结构的驱动降温效益机制受物候期的调控，核心在于植被冠层的遮阴与通风能力。具体表现为春夏植被生长旺盛期，植被冠层发育饱满，形成紧密的遮阴结构，能有效拦截短波辐射，降低地表受热程度，动态调节降温能力。在城郊区，低密度陡坡混合林生境展现出较好的整体降温能力和局部高温缓解能力，且混合林型的林草二级生境类型降温能力略优于纯林草复合型，表明地形与林分结构协同是影响降温效应的主导作用。较大的坡度进一步强化了混合林中的空气对流，使其降温效应优于单一的林草复合结构。

滨水复合型生境类型中，城乡低密度湿地生境和低密度圩田滨水生境的地表平均和最高温度最低，表明在该类型生境中水面率是影响降温效应的最主要因素。在城镇区，林草结构优于灌丛结构和草地，通过比较箱形图中的平均值可发现中密度混合林草地滨水生境的地表平均温度和最高温度均比中密度灌丛滨水生境和中密度半开敞草地滨水生境低，说明配置合理的岸带植被结构有助于提高滨水区域的降温效果。在城郊区，中密度密林滨水生境的平均温度和最高温度值略高于上述低密度湿地生境和低密度圩田滨水生境，反映林水复合结构的协同降温效果较强，这与 Wang等关于蓝绿空间协同降温的研究结论一致[40]。在滨水沿岸种植乔木，乔木冠层遮挡太阳辐射可减轻水体的受热效应，而较高的水体反射率有助于降低局部吸热，二





6 林地型生境类型热环境特征交叉分析
Cross analysis of thermal environment characteristics of woodland biotope types

7 植被复合型生境类型热环境特征交叉分析
Cross analysis of thermal environment characteristics of vegetation composite biotope types

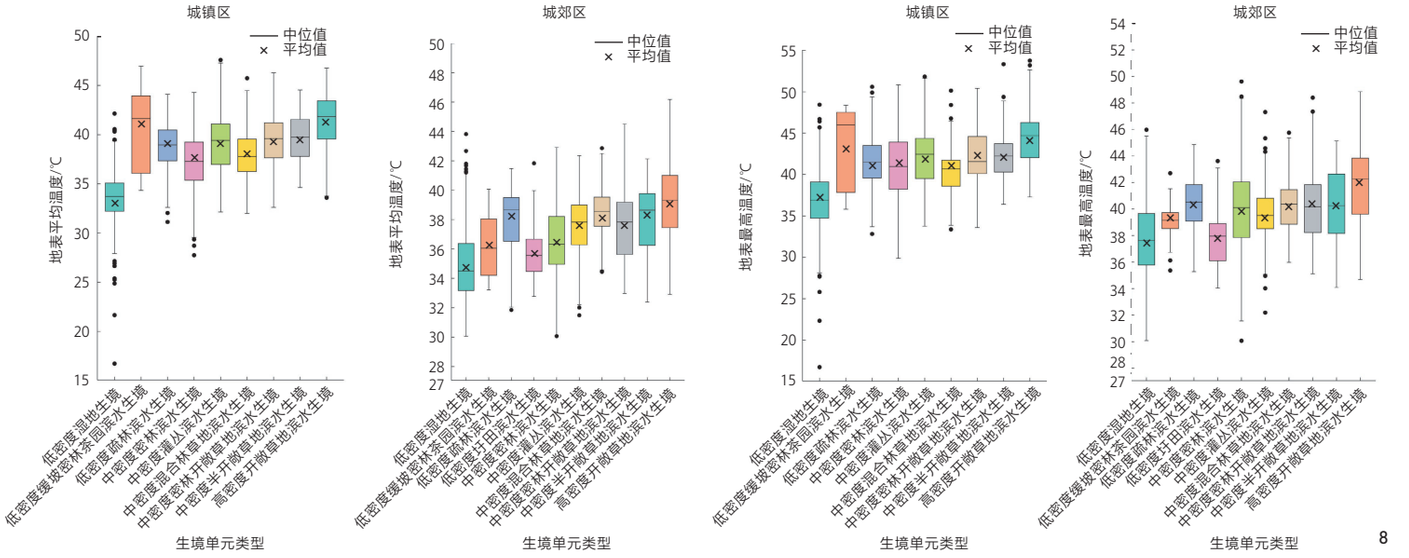
者共同作用形成显著的降温效应[41]。需要注意的是，环太湖河岸及林地区域，水杉、落羽杉等落叶阔叶型植物多为优势种，这种物候特征可能使生境降温效表现出明显的季节性特征。在春夏生长旺盛季，叶片的蒸散发等生理活动旺盛，产生显著的降温效应。而进入秋冬季节后，植物群落的生理活动减弱，调节气候的效应也随之衰减（图 8）。

农田复合型生境类型中，低密度陡坡密林传统农田生境和低密度密林传统农田生境的地表平均温度和地表最高温度值最低，表明乔木覆盖率较高的农林复合模式在降温效应上表现出明显优势（图 9）。并且随着城镇建设强度的升高，植被覆盖率下降，降温效果逐步减弱，反映出乔木的遮阴和蒸腾作用在农田生态系统降温作用中发挥关键作用。

4 基于降温效应的城市绿地生境设计优选策略

4.1 城市绿地生境精细化导控

中国当前的绿地系统规划在绿地类型、空间分布、面积规模等方面对城市绿地发展建设作出明确规定，在规划导控上更多侧重“位控”和“量控”，较少涉及“质控”。当前城市绿地发展正从增量向提质增效转型，为此，城市绿地规划导控机制亟待积极探索精细化的治理方法，突破传统以绿地及用地类型为控制基础的“质控”不足问题。本研究表明，生境类型及其要素组合特征具有显著地方性，是承载绿地生态系统服务、优化绿地空间环境品质的重要基本景观单元，因此在城市绿地系统规划中引入“主体生境类型-内部生境质量”双维度导控体系，是实现绿地生态效能优化与地方基因传承的关键路径之一。基于本研究在环太湖地区的实证结果，在主体生境类型方面，根据城乡梯度（城镇



8

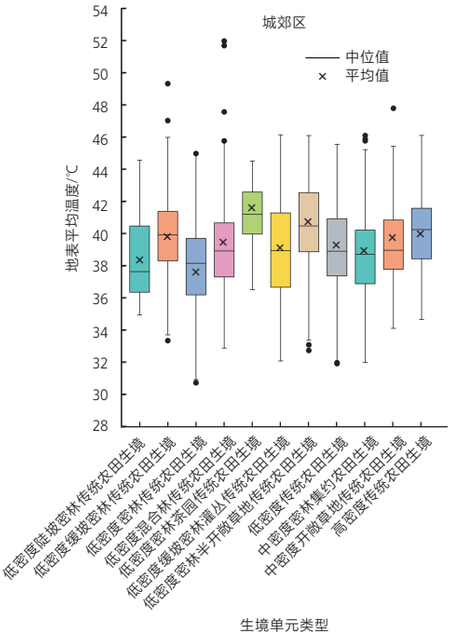
区和城郊区）、地形特征与城镇化建设强度（低、中、高密度）等，在空间规划中实现绿地生境分级分类落地落位引导；在内部生境质量方面，从单一要素的控制转向多要素组合导控，建议增加诸如地形-植被、林-水协同、乔-灌-草植被结构复杂度等复合生境的控制指标，通过要素间的协同作用，在有限的绿地空间内实现气候调节效能的最大化。

4.2 考虑城乡差异的一级绿地生境类型优选策略

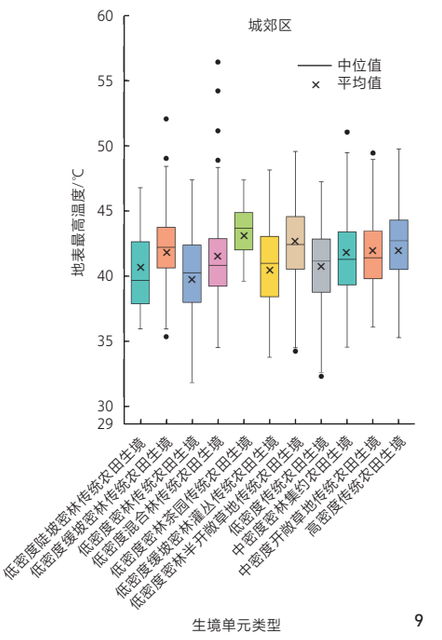
环太湖地区城镇区和城郊区的绿地生境热环境特征呈现显著差异，在气候变化背景下开展绿地生境生态修复，首先需要对城镇区和城郊区的绿地进行差异化调控。依托一级生境单元类型和热环境特征的交叉分析结果，在环太湖城镇区建议优先设计林地型和滨水复合型生境，其次是植被复合型和草地型生境；在城郊区建议优先构建林地型和滨水复合型生境，其次是植被复合型、农田复合型和草地型生境。

4.3 二级绿地生境类型优选细化与分类设计指引

依托二级生境单元类型与热环境特征的交叉分析，遵循“城镇区精准调控—城郊区系统强化”的双向优化思路，提出基于循证的生境类型多样化与城乡差异化优选设计策略。首先，针对林地型生境、植被复合型生境、滨水复合型生境和农田复合型生境 4 种一级生境类型，重点考虑生境降温机制与城乡梯度特征，制定二级生境类型优选建议和分类设计指引（表 2）。其次，考虑到城市绿地的游憩、生物多样性和碳汇等功能，进一步分析各二级生境类型与公园绿地（G1）、防护绿地（G2）、广场用地（G3）、区域绿地（EG）4 个绿地类别的适配性，提出提高降温效应的不同类型城市绿地生境优选建议（表 3），为规划实践提供可操作的技术指引。



8 滨水复合型生境类型热环境特征交叉分析
Cross analysis of thermal environment characteristics of waterfront composite biotope types



9

9 农田复合型生境类型热环境特征交叉分析
Cross analysis of thermal environment characteristics of farmland composite biotope types

5 结论与展望

本研究融合机器学习语义分割模型与高分辨遥感影像，探索城市绿地生境要素智能识别和生境类型细分的新技术路径，实现环太湖地区 25 983 个城市绿地生境单元的大批量、

表2 基于降温效应的典型绿地生境类型优选与分类设计指引

Tab. 2 Guidelines for optimal selection and classification design of typical green space biotope types based on cooling effect

一级生境类型	城乡分布	循证结论	二级生境类型优选			设计指引
			低密度	中密度	高密度	
林地型生境	城镇区	1）林地为最优降温生境； 2）坡度有利于降温，尤其是在高密度城区中	陡坡密林生境	缓坡密林生境	疏林生境	1）优先利用陡坡地形规划密林生境，在山地公园或城市边缘缓坡地带，通过植被配置与地形耦合提升降温效能：乔木层选择冠幅大、蒸腾速率高的乡土树种（如枫香树、朴）行列式种植，形成上疏下密的垂直结构，中层配置耐阴灌木，底层覆盖高蒸腾草本植物，减少地表太阳直射； 2）疏林的乔木配置避免过度密集，通过合理的株距设计兼顾遮阴与通风需求，提升高温时段的散热效率
	城郊区					1）依托丰富的土地资源与自然条件，以增加林地面积与优化林分结构为重点，通过混交不同树种（如落叶阔叶树与常绿树搭配）、丰富林下层植被（如灌木与草本植物搭配），构建多层次森林生态系统，增强对太阳辐射的拦截与蒸腾作用； 2）结合地形营造生态过渡带（如缓坡密林与周边农田、湿地的衔接），促进不同生境间的能量交换与生物多样性保护，提升降温效应的稳定性与生态系统服务的综合性
植被复合型生境	城镇区	1）多层次植被降温效应最佳； 2）密林主导下，需高效利用垂直空间	混合林半开敞草地生境	缓坡密林开敞草地生境	混合林生境	1）对于林草复合型生境，合理布局开敞草地位置，利用草地与密林的温差促进空气对流，形成局部通风廊道以加速热量散发；增加开敞草地周边乔木的遮阴面积，减少太阳辐射对草地的直射，降低地表温度； 2）混合林生境以保护现有密林斑块、构建复合植被层次为核心，在城市公园等大中型绿地中强化乔灌草立体配置，通过高大乔木遮阴、灌木层阻滞热量传导、草本层蒸腾调节的协同作用，提升局部热环境舒适度
	城郊区	1）多层次植被降温效应最佳； 2）降温效应依赖地形-植被协同作用	陡坡混合林生境、缓坡密林灌丛生境	混合林生境	混合林生境	1）混合林生境以保护现有密林斑块、构建复合植被层次为核心，在城市公园等大中型绿地中强化乔灌草立体配置。城郊区以增加混合林型生境比例为导向，通过优化针阔混交林、乔灌草复合群落配置，提高乔木覆盖的空间异质性，增强不同垂直层次对太阳辐射的吸收与散射； 2）利用地形与植被组合形成局部通风廊道（如开敞草地与密林的温差驱动空气流动），加速热量消散，同时通过提高植被多样性来提升生境对气候变化的适应性，确保降温效应的长期稳定； 3）对于林灌复合型生境，优化灌丛布局，丰富群落层次结构并提高植被覆盖率，增强对太阳辐射的吸收和阻挡
滨水复合型生境	城镇区	1）水面率对降温效应影响显著； 2）林-水协同降温效应影响显著； 3）该类生境受多重因素影响，需减少人工干扰	湿地生境、疏林滨水生境	密林滨水生境、混合林草地滨水生境		1）在城镇高密度滨水区，严格控制不透水硬质铺装比例，优化硬质驳岸的生态化改造（如采用植被缓冲带、透水材料），在前置湿地区域或滨水开阔处，搭建亲水平台，采用木质、石质的生态友好型材料，减少人工设施对水体蒸发与热量交换的干扰； 2）合理布局游憩设施，沿植被缓冲带、梯级净化池设计架空栈道，确保滨水空间的降温功能与公众使用需求之间的平衡
	城郊区		湿地生境	密林滨水生境、灌丛滨水生境、密林开敞草地滨水生境		1）优先保护与拓展中小型湖泊、湿地等自然水体，结合前置湿地、植被缓冲带、雨水梯级净化促进水体蒸发，通过在滨水岸带种植耐水湿高大乔木形成林水复合生境，利用植被遮阴减少水体升温、增强植被蒸腾作用，促进水体与周边陆地的热量交换； 2）优化水体形态（如设置生态沟渠、浅滩湿地），提升水体流动性与表面积，强化蒸发降温效果，构建兼具生态调节与自然景观功能的滨水系统
农田复合型生境	城郊区	降温依赖高乔木覆盖率，采用农林复合模式最大化降温效应	密林传统农田生境、混合林传统农田生境	密林集约农田生境		1）在城市周边农田区域，优先采用乔木覆盖率较高的农林复合模式（如田埂种植乔木带、林间套作农作物），利用乔木遮阴减少地表辐射、降低农田温度，同时通过树木蒸腾提高局部湿度； 2）减少草地要素在农田复合型生境中的占比，避免草地低降温效能对整体降温效应的削弱； 3）在规划层面，避免在热岛效应显著的城镇周边区域布局低密度密林茶园传统农田生境等降温效率低的生境类型，通过合理划定农田与林地、湿地的空间边界，形成功能互补的区域降温网络； 4）在农田和湿地复合区域，结合地形改造，构建微型水体（如季节性池塘、生态沟渠），强化水体与农田植被的协同作用，提升农田生态系统的气候调节能力与生物多样性支持功能

精细化识别与降温效应的分析，得到 3 点结论。1）基于 U-Net-ResNet50 主干训练的语义分割模型，对城市绿地生境要素智能识别的准确率达 94.59%，在此基础上采用 K-means 聚类分析细分获得 6 个一级、39 个二级生境类型，为精细化、自动化的城市绿地生境单元制图提供新技术支持。2）交叉分析显示，不同绿地生境类型的降温效应和关键影响因子存在差异，并呈现一定的城乡梯度特征。3）依据上述研究结果，提出双维导控体系，为相适配的绿地类型制定生境类型优选和设计指引，为气候适应型城市绿地生态精准修复提供技术支持。

为实现城市绿地精准增效，本研究运用监督分类算法的图像语义分割技术探索绿地生境精细化识别的技术突破。该方法虽已突破传统的生境识别方式，但仍存在一定局限。首先，基于机器学习的生境特征提取易受卫星遥感图像“同谱异物”和“同物异谱”问题影响，在一定程度上影响了样本的质量；尤其在季节物候期，植物变色产生的光谱信息相似，极易混淆，从而影响识别精度。未来有待使用多时相遥感影像进一步优化训练样本，降低光谱混淆对生境识别效果的影响。其次，本研究仅选取了 2022 年夏季典型高温日的地表温度反演数据，有待进一步针对不同季节、不同年份以及植被生长周期开展长时序动态监测，探索多时间情境的降温效应差异。最后，本研究通过交叉分析法初步探讨了地形、水体与植被的组合效应，但多要素组合间的非线性耦合机制较为复杂，后续需要结合更多实验数据，深入揭示多尺度生境要素间的交互作用。

表3 不同城市绿地类型的生境优选建议

Tab. 3 Recommendations for biotope selection in different urban green space types

一级生境类型	二级生境类型优选	城市绿地类型				典型应用场景
		公园绿地	防护绿地	广场用地	区域绿地	
林地型生境	低密度陡坡密林生境	√	√	×	√	大型山体片区
	中密度缓坡密林生境	√	√	×	√	丘陵或台地
	高密度疏林生境	√	×	○	×	城镇建成区中小型绿地
植被复合型生境	低密度陡坡混合林生境	√	○	×	√	郊野公园或生态保育区
	低密度缓坡密林灌丛生境	√	√	×	√	
	低密度混合林半开敞草地生境	√	×	○	√	
	中密度缓坡密林开敞草地生境	√	○	○	√	城市综合性公园或大型景区
	中密度混合林生境	√	√	○	√	
	高密度混合林生境	√	√	○	×	城镇建成区中小型绿地
滨水复合型生境	低密度湿地生境	√	×	×	√	大型自然湖泊
	低密度疏林滨水生境	√	×	○	√	湖滨生态缓冲带
	中密度混合林草地滨水生境	√	○	○	√	城市湿地公园
	中密度密林滨水生境	√	√	×	√	
	中密度灌丛滨水生境	√	○	○	√	
	中密度密林开敞草地滨水生境	√	○	○	√	滨水休闲游憩带
农田复合型生境	低密度密林传统农田生境	○	×	×	○	传统乡村农田片区
	低密度混合林传统农田生境	○	×	×	○	农林复合经营区
	中密度密林集约农田生境	×	×	×	○	集约化农业区

注：“√”表示适用；“○”表示部分地区适用；“×”表示不适用。

参考文献 (References)：

[1] AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023[EB/OL]. [2025-07-29]. https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/.

[2] ZEPP H, GESSNER M, GRUENHAGEN L, et al. Modeling the Cooling Effect of Urban Green Spaces: The Neglected Control Variables of “Soil Moisture” and “Biotope Types”[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 90: 128137.

[3] ZHANG B, XIE G D, GAO J X, et al. The Cooling Effect of Urban Green Spaces as a Contribution to Energy-Saving and Emission-Reduction: A Case Study in Beijing, China[J]. Building and Environment, 2014, 76: 37-43.

[4] 梁梓峰，王刚，魏玲，等.城市绿地生态系统质量对热岛效应调控功能的影响[J].生态学杂志，2025，44（10）：3210-3219.
LIANG Z F, WANG G, WEI L, et al. The Influence of Ecosystem Quality of Urban Green Spaces on the Regulation Function of Heat Island Effect[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44 (10): 3210-3219.

[5] XIAO X D, DONG L, YAN H N, et al. The Influence of the Spatial Characteristics of Urban Green Space on the Urban Heat Island Effect in Suzhou Industrial Park[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 428-439.

[6] 陈天一，赵聪聪，文素洁，等.城市生境单元制图研究进展及其在生物多样性保护中的应用[J].风景园林，2022，29（1）：12-17.
CHEN T Y, ZHAO C C, WEN S J, et al. Research Progress in Urban Biotope Mapping and Its Application in Biodiversity Conservation[J]. Landscape Architecture, 2022, 29 (1): 12-17.

[7] 仇宽彪，张慧，高吉喜，等.上海城市林地斑块冷岛效应的城乡梯度变化[J].生态学杂志，2021，40（5）：1409-1418.
QIU K B, ZHANG H, GAO J X, et al. Variation of Cool Island Effect for Urban Forest Patches Across an Urban-Rural Gradient in Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40 (5): 1409-1418.

[8] 高吉喜，宋婷，张彪，等.北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响[J].资源科学，2016，38（6）：1028-1038.
GAO J X, SONG T, ZHANG B, et al. The Relationship Between Urban Green Space Community Structure and Air Temperature Reduction and Humidity Increase in Beijing[J]. Resources Science, 2016, 38 (6): 1028-1038.

[9] GALLAY I, OLAH B, MURTINOVÁ V, et al. Quantification of the Cooling Effect and Cooling Distance of Urban Green Spaces Based on Their Vegetation Structure and Size as a Basis for Management Tools for Mitigating Urban Climate[J]. Sustainability, 2023, 15 (4): 3705.

[10] 李俊慧，赵海霞，白伟琪，等.不同功能区绿色基础设施降温差异性及其景观驱动机理：以南京市主城区绿地为例[J/OL].生态学报，2026，46（2）：1-16[2025-12-24]. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202504271005.
LI J H, ZHAO H X, BAI W Q, et al. Cooling Disparities of Green Infrastructure Across Urban Functional Zones and Their Landscape Driving Mechanisms: A Case Study of Green Spaces in the Main Urban Area of Nanjing[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(2): 1-16[2025-12-24]. https://doi.org/10.20103/j.stxb.202504271005.

[11] 丁成琴，史海静，高原，等.地形微生境对区域温度变化的缓冲作用[J].生态学报，2023，43（12）：5137-5149.
DING C Q, SHI H J, GAO Y, et al. The Buffering Effect of Topography Induced Microhabitat on Regional Temperature Change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (12): 5137-5149.

[12] FORMAN R T T, GODRON M. Landscape Ecology[M]. New York: Wiley, 1986.

[13] 刘晖，曹朔，陈宇.城市绿色空间生境样方构成与形态要素：以西安为例[J].风景园林，2021，28（6）：70-75.
LIU H, CAO S, CHEN Y. Composition and Morphological Elements of Habitat Quadrat in Urban Green Space: A Case Study of Xi'an[J]. Landscape Architecture, 2021, 28 (6): 70-75.

[14] 胡远东，宋坤.生境营造与城市绿地生物多样性提升[J].科学，2023，75（6）：6-10.
HU Y D, SONG K. Create Habitats to Boost Biodiversity in Urban Greening[J]. Science, 2023, 75 (6): 6-10.

[15] 汪洁琼，江卉卿，王敬.基于深度学习的水体生境图像分类与质量评价：以长三角一体化先行启动区为例[J].风景园林，2023，30（7）：22-28.
WANG J Q, JIANG H Q, WANG M. Water Habitat Image Classification and Quality Evaluation Based on Deep Learning: A Case Study of the Pilot Zone of the Yangtze River Delta Integration Area[J]. Landscape Architecture, 2023, 30 (7): 22-28.

[16] 王敏，余谦益，汪洁琼.融合景观特征识别和城乡梯度分析的滨水生境网络构建方法：以江苏省昆山市为例[J].中国园林，2025，41（1）：117-124.
WANG M, YU Q Y, WANG J Q. Construction Method of Waterfront Habitat Network that Integrates Landscape Character Identification and Urban-Rural Gradient Analysis: A Case Study of Kunshan City in Jiangsu Province[J]. Chinese Landscape Architecture, 2025, 41 (1): 117-124.

[17] 杜雪莲，王世杰.喀斯特石漠化区小生境特征研究：以贵州清镇王家寨小流域为例[J].地球与环境，2010，38（3）：255-261.
DU X L, WANG S J. Micro-habitat Characteristics in the Karst Desertification Area: A Case Study of the Wangjiazhai Catchment in Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2010, 38 (3): 255-261.

[18] 刘晖，吴小辉，李仓拴.生境营造的实验性研究（二）：场地生境类型划分与分区[J].中国园林，2017，33（7）：46-53.
LIU H, WU X H, LI C S. An Experimental Research Approach on Habitat-Site Design (II): Study on Habitat-Site Types and Zoning in Urban Green Space[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33 (7): 46-53.

[19] 甘耿昊，林子琦，黄瑞，等.基于日照时长的成都市屋顶绿化生境类型划分研究[J].城市建筑，2022，19（1）：179-183.
GAN G H, LIN Z Q, HUANG R, et al. Study on the Classification of Roof Greening Habitat Types in Chengdu Based on Sunshine Duration[J]. Urbanism and Architecture, 2022, 19 (1): 179-183.

[20] 吴丹，王莹，乐莺.基于无人机多源遥感数据的城市公园绿地生境空间识别研究[J].园林，2025，42（8）：121-130.
WU D, WANG Y, LE Y. Research on the Spatial Identification of Urban Park Green Space Habitats Based on UAV Multi-source Remote Sensing Data[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2025, 42 (8): 121-130.

[21] 胡玲艳，郭睿雅，郭占俊，等.融合 PDE 植物时序图像对比学习方法与 GCN 跳跃连接的 U-Net 温室甜樱桃图像分割方法[J].智慧农业（中英文），2025，7（3）：131-142.
HU L Y, GUO R Y, GUO Z J, et al. U-Net Greenhouse Sweet Cherry Image Segmentation Method Integrating PDE Plant Temporal Image Contrastive Learning and GCN Skip Connections[J]. Smart Agriculture, 2025, 7 (3): 131-142.

[22] 杜培军，夏俊士，薛朝辉，等.高光谱遥感影像分类研究进展[J].遥感学报，2016，20（2）：236-256.
DU P J, XIA J S, XUE Z H, et al. Review of Hyperspectral Remote Sensing Image Classification[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20 (2): 236-256.

[23] SCHMIDHUBER J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview[J]. Neural Networks, 2015, 61: 85-117.

[24] 董蕴雅，张倩.基于 CNN 的高分遥感影像深度语义特征提取研究综述[J].遥感技术与应用，2019，34（1）：1-11.

DONG Y Y, ZHANG Q. A Survey of Depth Semantic Feature Extraction of High-Resolution Remote Sensing Images Based on CNN[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34 (1): 1-11.
[25] 张静，靳淇兆，王洪振，等.多尺度信息融合的遥感图像语义分割模型[J].计算机辅助设计与图形学学报，2019，31（9）：1509-1517.
ZHANG J, JIN Q Z, WANG H Z, et al. Semantic Segmentation on Remote Sensing Images with Multi-scale Feature Fusion[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31 (9): 1509-1517.
[26] 汪洁琼，江卉卿，陈俊延，等.人工智能赋能城市滨水空间秋季景观特征识别与活力提升：以上海市黄浦江为例[J].中国园林，2024，40（9）：15-21.
WANG J Q, JIANG H Q, CHEN J Y, et al. Identification of Autumn Landscape Characteristics and Vitality Improvement in Urban Waterfront Spaces Based on Artificial Intelligence: A Case Study of Huangpu River in Shanghai[J]. Chinese Landscape Architecture, 2024, 40 (9): 15-21.
[27] YI Y N, ZHANG Z J, ZHANG W C, et al. Semantic Segmentation of Urban Buildings from VHR Remote Sensing Imagery Using a Deep Convolutional Neural Network[J]. Remote Sensing, 2019, 11 (15): 1774.
[28] 吴瑞姣.混合 U-Net 模型下南方丘陵地区耕地识别[J].测绘通报，2023（12）：57-62.
WU R J. Cropland Recognition in Southern Hilly Areas Under a Hybrid U-Net Model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023 (12): 57-62.
[29] 陈松钰，左强，王志芳.基于改进的 U-Net 的遥感图像语义分割[J].计算机应用与软件，2024，41（8）：271-274.
CHEN S Y, ZUO Q, WANG Z F. Semantic Segmentation of Remote Sensing Image Based on Improved U-Net[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41 (8): 271-274.
[30] 徐亮亮，马开森，王霞，等.LA-UNet 网络模型在城市绿地遥感分类中的应用[J].应用生态学报，2024，35（4）：1101-1111.
XU L L, MA K S, WANG X, et al. Application of LA-UNet Network Model in Remote Sensing Classification of Urban Green Space[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35 (4): 1101-1111.
[31] 上海市人民政府，江苏省人民政府，浙江省人民政府.上海大都市圈空间协同规划[EB/OL]. [2026-01-25]. https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20220928/43ffc9be207448c4b2c910c17ac02aaa.html.
Shanghai Municipal People's Government, Jiangsu Provincial People's Government, Zhejiang Provincial People's Government. Spatial Coordination Planning of Shanghai Metropolitan Area[EB/OL]. [2026-01-25]. https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20220928/43ffc9be207448c4b2c910c17ac02aaa.html.
[32] 徐知宇，周艺，王世新，等.面向 GF-2 遥感影像的 U-Net 城市绿地分类[J].中国图象图形学报，2021，26（3）：700-713.
XU Z Y, ZHOU Y, WANG S X, et al. U-Net for Urban Green Space Classification in Gaofen-2 Remote Sensing Images[J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26 (3): 700-713.
[33] 钟兴润，田晨斌，李新宏，等.基于改进 U-Net 的城市洪涝灾害图像识别模型[J].中国安全科学学报，2025，35（10）：190-197.
ZHONG X R, TIAN C B, LI X H, et al. Improved U-Net-Based Model for Urban Flood Disaster Image Recognition[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35 (10): 190-197.
[34] OSAWA S, YAMASHITA H, MORI S, et al. The Preparing of Biotope Mapping in a Municipal Scale by Using Kamakura City as a Case Study[J]. Journal of the Japanese Institute of Landscape Architecture, 2004, 67 (5): 581-586.
[35] 王敏，宋岩.服务于城市公园的生物多样性设计[J].风景园林，2014，21（1）：47-52.
WANG M, SONG Y. Biodiversity Design for Urban Parks[J]. Landscape Architecture, 2014, 21 (1): 47-52.
[36] ZHANG Z T, CHEN X J, WANG C, et al. Structured Multi-view K-Means Clustering[J]. Pattern Recognition, 2025, 160: 111113.
[37] LIU S J, WANG Z J, KUMILAMBA G, et al. Optimizing Green Space Configuration for Mitigating Land Surface Temperature: A Case Study of Karst Mountainous Cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 125: 106345.
[38] ARNOLD C L Jr, 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.
[39] STEWART I D, OKE T R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93 (12): 1879-1900.
[40] WANG M, SU Y Q, WANG J Q, et al. How to Improve Blue–Green–Gray Infrastructure to Optimize River Cooling Island Effect on Riparian Zone for Outdoor Activities in Summer[J]. Land, 2025, 14 (7): 1330.
[41] SHI D C, SONG J Y, ZHONG Q L, et al. Cooling Wisdom of "Water Towns": How Urban River Networks Can Shape City Climate?[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 300: 113925.

图表来源(Sources of Figures and Tables)：
图 1、4~5 底图来源于天地图（www.tianditu.gov.cn），审图号为 GS（2024）0650；图 2 遥感影像数据（卫星瓦片）来源于美国 DigitalGlobe 公司的捷鸟（QuickBird）商业卫星与 EarthSat 公司（earthsat.com）提供的混合数据源；其余图表由作者绘制。

（编辑 / 刘颖）

作者简介：
王敏 / 女 / 博士 / 同济大学建筑与城市规划学院党委副书记、副教授、博士生导师 / 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室水绿生态智能分实验中心联合创始人 / 研究方向为水绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续

孙慧怡 / 女 / 同济大学建筑与城市规划学院在读博士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计

余谦益 / 女 / 同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计

汪洁琼 / 女 / 博士 / 同济大学建筑与城市规划学院景观学系副主任、副教授、博士生导师 / 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室水绿生态智能分实验中心联合创始人 / 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心成员 / 研究方向为水绿生态智能、景观生态规划与设计、水生态、生态系统服务、城市生态修复工程技术与设计
通信作者邮箱：echo_wang@tongji.edu.cn

WANG M, SUN H Y, YU Q Y, WANG J Q. Precise Identification of Urban Green Space Biotopes and Optimal Design for Enhancing Cooling Effect Based on Deep Learning: A Case Study of Around Taihu Lake Region[J]. Landscape Architecture, 2026, 33(3): 51-61. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20250674.

Precise Identification of Urban Green Space Biotopes and Optimal Design for Enhancing Cooling Effect Based on Deep Learning: A Case Study of Around Taihu Lake Region

WANG Min, SUN Huiyi, YU Qianyi, WANG Jieqiong*

Abstract:
[Objective] Against the dual pressures of global climate change and rapid urbanization, the urban heat island effect is becoming increasingly severe. Urban green spaces offer a near-natural approach to mitigating the heat island effect. Their cooling effects are influenced by biotope characteristics and the differences among biotope types. Therefore, typologically revealing the impact

patterns of urban green space biotope characteristics on cooling effects is crucial for improving the urban thermal environment and contributing to the construction of an ecologically livable environment.

[Methods] The study area is Around Taihu Lake region in the Yangtze River Delta, involving four cities (Suzhou, Wuxi, Changzhou, Huzhou) encompassing 16 county-level administrative units, covering approximately 13,000 km^2. This region, centered around Taihu Lake, features a dense river network, numerous lakes, and diverse types of urban green spaces containing various biotopes. However, the urban heat island problem has become increasingly severe in recent years. Consequently, optimizing biotope type configuration during urban ecological restoration to enhance the cooling effect of green spaces has become a significant focus for building an ecologically livable city in this region. This study first introduces a U-Net-ResNet50 backbone training network combined with high-resolution remote sensing images to build an intelligent identification model, overcoming the technical bottleneck of traditional methods struggling with large-scale, high-precision biotope surveys and classification. Building the intelligent identification model mainly involves four steps: 1) Using 25,983 satellite images from 508 green space samples as the model database. Subsequently, analyzing the composition characteristics of biotope elements in these 508 urban green space samples, the study identified 10 natural biotope elements as targets for manual annotation and semantic segmentation recognition. 2) Manually annotating local satellite images containing all biotope element types to create a foundational dataset for supervised learning model training. After model training and optimization, the supervised model was applied to annotate biotope elements in satellite images from other areas, ultimately producing the training and testing datasets required for the U-Net–ResNet50 network model. 3) A semantic segmentation platform was constructed using the PyTorch framework, with ResNet50 and U-Net as the backbone training networks. The prepared training set data was input for training, and a loss function was set to evaluate the model's robustness. Upon completion of training, the model achieved good stability and consistency. 4) Applying the trained and verified reliable model to Around Taihu Lake region. Subsequently, based on the intelligent identification results of urban green space biotope elements, this study used K-means clustering to derive subdivided biotope types. Next, using 30 m resolution land surface temperature retrieval data from a typical high-temperature day in 2022, this study employed mean and maximum land surface temperatures to characterize the cooling effect. Cross-analysis was used to reveal the differences in cooling effects among different biotope types and key influencing factors. Taking biotope types as the entry point, this research further refines the exploration of the cooling effects of urban green spaces. The study proposes differentiated preferential design guidance for biotopes, providing technical support for the precise ecological restoration of climate-resilient urban green spaces.

[Results] 1) A total of 6 primary-level and 39 secondary-level green space biotope types were identified through detailed classification. 2) The cooling effects of the primary biotope types were ranked in descending order: woodland biotope > waterfront composite biotope > vegetation composite biotope > farmland composite biotope > grassland biotope > hard-paved biotope. Urban-rural comparative results showed that the thermal environment stability of biotope types in suburban areas was significantly better than that in urban areas. 3) The cooling effects of various biotopes were influenced by the urban-rural gradient, with different key biotope characteristic factors identified as drivers. The cooling effect of woodland biotopes was mainly driven by topography and slope. For vegetation composite biotopes, vegetation structure was the core factor in urban areas, while a synergistic effect of topography and forest stand structure was observed in suburban areas. The cooling effect of waterfront composite biotopes was primarily governed by multiple factors, including water surface ratio, vegetation structure, and tree canopy coverage. Within farmland composite biotopes, agroforestry models with higher tree canopy coverage demonstrated significant cooling effects. 4) Based on the heterogeneity in the spatial distribution of cooling effects across different green space biotope types along the urban-rural spectrum, biotope types with high cooling efficacy were preferentially selected. For urban areas characterized by limited land resources, high development intensity, and reliance on single biotope element drivers, design strategies for specific biotope types were precisely targeted and regulated. For suburban areas, which benefit from a better ecological baseline and rely on the synergistic driving effects of multiple biotope elements, design strategies for specific biotope types were systematically enhanced.

[Conclusion] The U-Net-ResNet50 intelligent identification model facilitates the precise and batch-processing-enabled identification and classification of urban green space biotope elements. This approach overcomes the technical limitations of traditional biotope element identification methods, namely, low efficiency and restricted sample sizes, and provides a transferable intelligent methodology for precise biotope mapping and classification in related fields. The study elucidates the differential patterns in cooling effects and their driving factors across various urban green space biotope types, thereby robustly supporting the preferential design of green space biotopes. It offers a valuable reference for achieving climate-resilient, near-natural ecological restoration in urban green spaces.

Keywords: landscape architecture; biotope type; cooling effect; U-Net network architecture; cross-analysis; Around Taihu Lake region

Authors:

WANG Min, PH.D., is deputy Party secretary, associate professor, and doctoral supervisor in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, a co-founder of Eco-SMART LAB attached to Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education. Her research focuses on ecosystem services for blue and green spaces, urban green space and ecological planning and design, and resilient landscape and urban sustainability.

SUN Huiyi is a Ph.D. candidate in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University. Her research focuses on landscape planning and design.

YU Qianyi is a Master graduate in the College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University. Her research focuses on landscape planning and design.

WANG Jieqiong, Ph.D., is a deputy director, associate professor and doctoral supervisor in the Department of Landscape Architecture, College of Architecture and Urban Planning (CAUP), Tongji University, a co-founder of Eco-SMART LAB attached to Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, and a member of Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources. Her research focuses on water-green ecological intelligence, landscape ecological planning and design, water ecology, ecosystem services, and urban ecological restoration technology and design.

Corresponding author Email: echo_wang@tongji.edu.cn