哈尔滨城市森林景观季节变化对地表温度影响的定量研究*

丛 丹[1,2] 王 蕾[1,2] 贾 佳[1,2] 翟雅琳[1,2] 张林萱[1,2] 姚允龙[3] 宁 静[4]

1 东北林业大学园林学院 哈尔滨 150040
2 黑龙江省寒区园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室 哈尔滨 150040
3 东北林业大学野生动物与自然保护地学院 哈尔滨 150040
4 东北农业大学公共管理与法学院 哈尔滨 150040

摘要：城市森林是平衡城市环境温度的自然解决方案，对降低城市热岛负面影响和发挥生态效益具有重要意义。文章利用地理信息技术提取春季、夏季和秋季城市森林景观和 LST 空间信息，探究不同季节城市森林景观指标对 LST 变化的最佳解释模型。结果表明，不同季节城市森林景观组成指标与 LST 的相关性最为显著，但不同类型的林地景观与 LST 的相关关系和程度均存在差异。因此，丰富森林景观内部植被种类的多样性，增加城市森林斑块形状的复杂性，并联通单独的城森林景观斑块形成森林生态廊道，是最大限度发挥哈尔滨市城市森林景观调节 LST 效益的方法。

关键词：城市森林；景观指数；热岛效应；地表温度
DOI：10.12169/zgcsly.2023.05.09.0005

Effects of Seasonal Changes of Urban Forest Landscape on Land Surface Temperature in Harbin: A Quantitative Study

Cong Dan[1,2] Wang Lei[1,2] Jia Jia[1,2] Zhai Yalin[1,2] Zhang Linxuan[1,2] Yao Yunlong[3] Ning Jing[4]
(1. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Heilongjiang Key Laboratory of Germplasm Resources Development and Landscape Ecological Restoration in Cold Region, Harbin 150040, China; 3. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 4. School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150040, China)

Abstract: Urban forest is a nature based solution to the balanced temperature of urban environment, which is importantly significant for reducing the negative impact of urban heat island and maximizing the ecological benefits of urban forest. Geographic information technology is used to extract spatial information of urban forest landscape and land surface temperature (LST) in spring, summer and fall, so as to explore the best explanation model of urban forest landscape indicators on LST changes in different seasons. The

收稿日期：2023-05-09
* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（42171246）；国家自然科学基金面上项目（41971217）；国家自然科学基金青年基金项目（41101177）；中国博士后科学基金项目（2017M621229）；黑龙江省重点研发计划项目（GZ20210193）；黑龙江省博士后科研启动金项目（LBH-Q21051）

第一作者：丛丹（1997- ），女，硕士生，研究方向为城市绿色景观格局及其生态服务功能定量化研究。E-mail：congdan@nefu.edu.cn
通信作者：王蕾（1983- ），女，博士，教授，研究方向为城市绿色景观格局及其生态服务功能定量化研究。E-mail：wanglei@nefu.edu.cn

results show that the urban forest landscape composition indicators are the most significantly correlated with the LST in different seasons, while the correlations between different types of forest landscapes and LST varied in both relationship and extent. Therefore, the ways to maximize the benefits of urban forest landscapes in regulating LST in Harbin City include enhancement of vegetation species diversity within forest landscapes, increase of complexity in urban forest patch shapes and linkage of individual urban forest landscape patches to form forest ecological corridors.

Keywords: urban forest; landscape index; heat island effect; surface temperature

随着我国城镇发展不断推进，高密度发展导致城市下垫面景观发生了剧烈变化，改变了辐射能量平衡，导致地表温度（Land Surface Temperature，LST）升高，加剧了城市热岛效应（Urban Heat Island，UHI）。这导致城市环境降温的能源消耗增加[1]，严重影响了城市居民的舒适度，甚至增加了城市居民死亡率[2]。城市热岛现象已对城市生态环境产生了严重的负面影响，成为城市生态学和城市规划等相关领域的研究热点。城市森林景观作为城市最重要的生态基础，能够通过树木植被蒸散发、遮阳和增加反照率等作用效果降低城市建筑环境的热负荷[3]。因此，国内外学者越来越强调城市森林景观对 LST 的调节作用，以实现城市绿色、健康、可持续发展的目标。

自 20 世纪 80 年代以来，各国学者借助遥感影像以及地理信息技术对森林景观的降温效应和热环境缓解能力进行了监测、评估和研究[4-6]。诸多研究均证实，从庭院规模到城市规模的城市森林景观在缓解城市热岛效应方面表现出了优秀的降温效果，表明 LST 随着城市森林景观覆盖程度的增加而降低[7-8]。此外，由于在城市化过程中的城市景观转换导致城市地区的森林景观异质性高于其他地区[9]。因此，许多学者关注到了景观格局背景下城市森林景观对 LST 的影响。例如，Chen 等[10]发现城市森林景观斑块越紧凑，对 LST 调节效果越显著。因此，在城市森林景观规划建设过程中应当注重森林景观的组成和配置，加强城市森林景观调节 LST 的效益。

尽管当前许多研究已经探讨了城市森林景观调节 LST 的效果，但影响森林景观调节 LST 效益的因素仍有进一步讨论的空间。由于日照条件和城市森林的空间特征在不同气候环境和季节都是变化的，导致城市森林对热环境调节效果存在很大差异[11]。同时，Hu 等[12]分析了二维和三维因子与 LST 的关系发现，在夏季和春季，二维土地利用变量与 LST 的相关性最强，而寒冷季节时三维建筑变量对 LST 的影响更大。此外，有学者指出城市森林景观的林型具有明显的热环境调节相关生态服务功能差异[13]，且常绿林比落叶林和针阔混交林具有更强的冷却效果[14]。然而，在上海的一项研究中发现，阔叶林与针阔混交林是上海城市森林景观降温效应的主要贡献者[15]。因此，需要根据所在城市的具体气候环境条件进行分析调整，以发挥城市森林最佳生态效益。

综上所述，不同气候环境和季节城市森林景观对 LST 的影响因素有所差异，这种不一致性可能会给未来的城市规划带来巨大的应用挑战。与低纬度和其他中纬度城市相比，寒地气候城市具有不同的气候特征。因此，有必要分析城市森林景观驱动因素对 LST 的季节性综合影响，而不是评估单个因素在单个季节的影响。选择季节差异显著的寒地气候城市哈尔滨作为研究对象，系统厘清寒地城市森林景观格局对 LST 的综合影响：1）探究不同季节城市森林斑块空间混杂状态对 LST 的影响；2）分析不同季节城市森林景观特征与 LST 关系；3）科学表征 LST 的城市森林景观斑块复合指数。

1　研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省南部（125° 42′—130°10′E，44°04′—46°40′N），是中国纬度最高的省会城市。哈尔滨季节分明，属中温带大陆性季风气候。原有植被以榆树森林疏林草地为主，植被资源丰富，种类繁多。

哈尔滨作为东北振兴发展的重要城市，由于大规模的城市建设导致人造表面积急剧增加，不可避免地带来城市热岛效应。因此，哈尔滨为研究寒地城市森林对 LST 的季节变化影响提供了理想的研究区域。

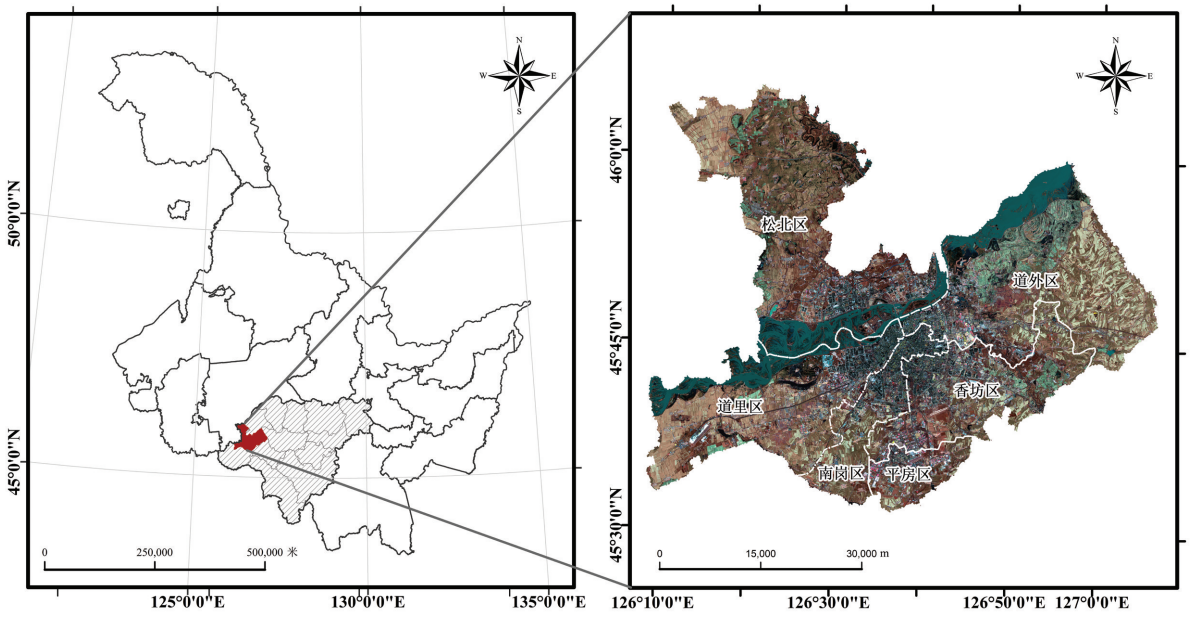


图 1 研究区示意图

2 研究方法

2.1 城市森林景观提取

考虑数据的可获性以及针对季节变化时期的研究需求，采用时间连续性较好的 Landsat 8 数据，该数据由美国地质调查局（United States Geological Survey，USGS）提供。由于研究地区冬季植被被雪覆盖难以提取相关信息，研究筛选了 2020 年研究区域影像质量较好的春季、夏季和秋季时期遥感数据，数据获取时间如表 1 所示。

表 1 Landsat 8 遥感影像数据

序号	行列号	过境时间（年/月/日）	分辨率/m	传感器	季节
1	118/28	2020/04/10	30	OLI/TIRS	春季
2	118/28	2020/07/15	30	OLI/TIRS	夏季
3	118/28	2020/10/19	30	OLI/TIRS	秋季

利用 ENVI 软件完成辐射定标、大气校正和图像融合等预处理。由于研究区针阔混交林针叶树和阔叶树比例分配不同，影响了光谱和特征，因而精确识别针叶林和针阔混交林有一定困难。因此，为进一步提高不同类型城市森林景观提取的准确率，参考李梦颖等[16]的研究成果，结合面向对象和支持向量机的分类方法进行森林类型识别。同时，参照地理国情监测指标分类（GQJC03-2017），并结合研究区城市森林覆盖特点及研究目的，确定 4 种城市森林景观类型，即针叶林、阔叶林、针阔混交林和草地。为验证分类结果的准确性，建立分类结果与检验样本的混淆矩阵，结合 Google Earth 卫星影像验证总体分类精度，准确率均能达到 82%以上，满足本次研究需求。

2.2 LST 反演验证

参考 Wang 等[17]的研究结果，本次研究采用单窗算法反演研究区的 LST 信息，该算法由 Wang 等[18]基于 Qin 等[19]提出的单窗算法针对 Landsat 8 TIRS 第 10 波段提出了改进的单窗算法（Improved Mono-Window Algorithm）。在 LST 反演过程中单窗算法所需的大气参数较传统的计算方式少，且反演精度较高，具有较强的普适性。因此基于 ENVI 软件，采用单窗算法对 Landsat 8 的第 10 波段进行反演，主要计算公式如下：

$$Ts=[a(1-C-D)+(b(1-C-D)+C+D)\times Ta-D\times Ta]/C \quad (1)$$

式（1）中：Ts 为 LST（℃）；a 和 b 是普朗克方程相关的系数；C 为地表比辐射率（ε）；D 为大气透射率（τ）；Ta 为大气平均作用温度。

同时，为了保证 LST 反演的准确性，本文采用 MODISLST 产品（MOD11A2）与单窗算法反演的 LST 信息与其进行对比验证，公式为：

$$\Delta = \frac{|LST - LST_M|}{LST_M} \times 100\% \quad (2)$$

式（2）中：Δ 为相对误差；LST 为 Landsat 8 影像反演 LST 结果；LST_M为 MODISLST 数值。验证结果显示，由于两者过境时间的差异，除春季误差在 0.01%～13%以外，夏季和秋季均不超过 10%，表明本次反演的 LST 具有客观真实性，可用于后续的研究。

2.3　城市森林组分指标选择

为全面具体地反映城市森林景观现状，分析城市森林景观与 LST 的对应关系，本次研究扩大了传统城市森林景观的界定范围，包含被树木、草本植物覆盖的土地，如公园、球场和其他自然绿色空间[20]。研究表明，城市森林的景观组成和景观配置对温度有显著影响[21]。选择草地（Grass_Pre）、阔叶林（Broad_leaved_Pre）、针叶林（Coniferous_Pre）和针阔混交林（Mixed_Pre）的面积比作为影响 LST 变化的景观组成因子[22]。此外，通过评价景观格局指标在不同背景下的适用性，选取 10 个景观多样性和配置指标作为 LST 变化的解释变量。

1）面积指标。城市森林景观斑块大小不仅影响城市森林地表温度平衡效果，而且影响居住环境的健康发展。本研究选择草地、阔叶林、针叶林和针阔混交林的面积比衡量城市森林景观用地面积分布情况。此外，选择代表景观破碎化程度的最大斑块指数（LPI）衡量城市中最大森林景观斑块占总土地面积的比例。

2）形状指标。由于景观斑块的形状复杂会导致景观结构复杂，从而影响城市森林景观对 LST 调控的效果。本研究选取景观边缘密度指数（ED）、平均斑块周长面积比（PARA_MN），以探究城市森林景观斑块的形状以及结构的复杂程度对 LST 的影响。

3）聚集度指标。聚集度指数代表景观中斑块的空间聚集或分离程度。当一个景观由几个大的斑块组成或同一类别的斑块充分连接时，聚集程度就高。选取斑块密度（PD）、景观形状指数（LSI）、蔓延度（CONTAG）、斑块凝聚度（COHESION）、聚集指数（AI）、分裂指数（SPLIT）作为集聚程度的指标。PD 表示景观的破碎程度。LSI 是一个景观斑块形状指数，代表与形状复杂性相关的聚集程度。SPLIT 计算景观中大小相等的斑块的数量。其中，CONTAG 具有特殊的空间属性，可用于反映景观中不同斑块类型的聚集和延伸程度。

4）多样性指标。香浓多样性指数（SHDI）能够反映景观异质性，当特殊斑块出现在景观中，或各类型斑块分布不甚均匀时，SHDI 值的变化将较为敏感。此外，SHDI 与物种多样性呈正态分布关系。

2.4　统计分析

首先，借助 R 软件对比 14 个景观指标与 LST 的 Pearson 相关系数得到它们与 LST 相关性和显著性差异，同时通过 0.05 水平上的显著性检验，识别出各季节对 LST 显著影响的景观指标。其次，采用全子集回归衡量各因子对各季节 LST 变化的综合解释率。最后，由于这些复合解释模型调整后的 R^2 值非常相似，本研究结合赤池信息准则（AIC）值作为标准，以最小 AIC 值确定最佳解释模型。

3　结果与分析

3.1　城市森林景观空间特征差异

如图 2 所示，随着季节更替变化哈尔滨城市森林景观空间格局分布情况大体相似，但不同季节城市森林景观空间占比有较大的变化。研究区城市森林景观斑块受到研究区内部建筑布局、道路规划以及河流等影响，城市森林景观斑块形态不规则，面积大小存在差异，且分布不均衡，靠近城市中心区域的森林景观斑块呈散点式分布，较大面积的城市森林景观斑块大多集中分布于城市外缘区域。

如表 2 所示，表征城市森林景观面积的指数因子 LPI 的大小关系为春季>秋季>夏季。表征城市森林景观的形状指数中，ED 和 PD 的高低关系为夏季>秋季>春季，PARA_ MN 为秋季>夏季>春季，说明夏季和秋季时期城市森林景观形状、边界较为复杂，但森林斑块较为分散。表征城市

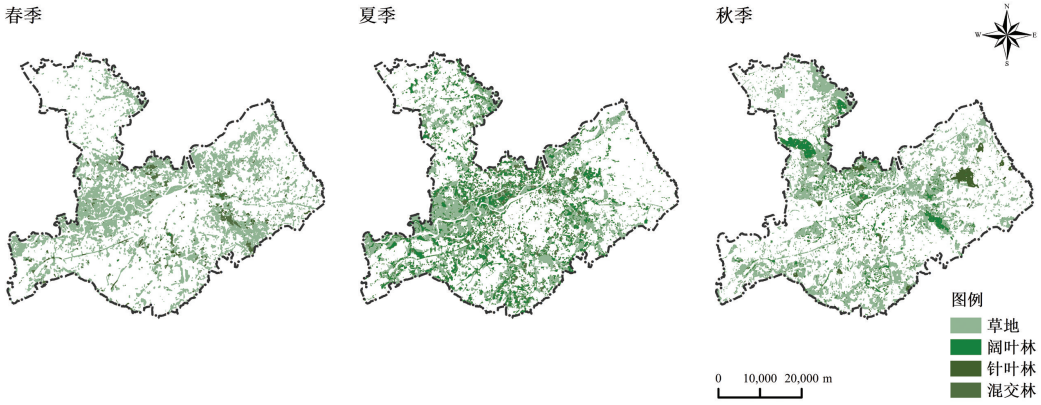


图 2 哈尔滨城市森林空间分布

表 2 各季节哈尔滨城市森林景观指数描述性统计

指数类型	指数名称	春季	夏季	秋季
面积指数	LPI	10.29	5.43	5.66
形状指数	ED	2.99	11.41	5.36
	PARA_ MN	133.16	134.85	137.62
	PD	2.02	3.34	2.75
聚集度指数	LSI	41.23	48.01	40.67
	CONTAG	78.64	44.30	61.15
	COHESION	89.41	77.36	83.84
	AI	54.74	45.82	52.35
	SPLIT	39.52	151.75	75.92
多样性指数	SHDI	0.37	0.89	0.69

森林景观聚集度指数的 4 个指数中，LSI 的高低关系为夏季>春季>秋季，CONYAG 和 AI 的高低关系为春季>秋季>夏季，SPLIT 的高低关系为夏季>秋季>春季，说明夏季时期城市森林景观斑块形状复杂，但斑块之间的连通性和聚集程度较差，春季时期森林景观要素分布更为集中并且景观斑块间的连通性较强。表征城市森林景观多样性指数的 SHDI 的高低关系为夏季>秋季>春季，说明春季时期城市森林景观异质性较小，景观类型较为单一。

3.2 城市森林景观 LST 季节异质性

如图 3 所示，春季与秋季时期研究区内部 LST 空间分布格局最为相似。其中，位于研究区中心部位的主城区出现了 LST 较低的城市“冷岛”现象，LST 较高的地区则主要分布在植被覆盖较高的农田和绿化程度较高的边缘地区；夏季时期 LST 空间格局与寒冷季节相反，呈现城市热岛现象。

如表 3 所示，针叶林在春季的 LST 平均值最高，但在秋季时期却最低。这是由于哈尔滨市春季时期较为寒冷同时存在降雪的现象，此时期的草地和阔叶林尚未形成茂密的枝叶，只有针叶林作为常绿树种能够在寒冷的春季继续发挥其生态效益，调节周围 LST 从而形成温暖的环境。夏季 LST 均值最低的是草地，这是由于大部分草地分布于水体周围，环境空旷利于热量的扩散，且没有密集的建筑环境与人造表面吸收热量，因此草地区域受周围影响较小，形成了凉爽的环境。

3.3 城市森林景观特征对 LST 季节变化的影响因素

3.3.1 城市森林景观指标与 LST 的相关性

如图 4 所示，表征城市森林的组成指标在各季节与 LST 相关性较为明显，其中，夏季的城市森林景观组成指标与 LST 的相关性最为明显。Grass_Per 和 Broad_leaved_Pre 与 LST 在 3 个季节表现出相似的影响效果，在春季和夏季前者与 LST 呈强负相关，后者与 LST 则表现出强正相关。然而，在秋季则展现出与春夏两季相反的结果，即 Grass_Per 与 LST 呈现强正相关，Broad_leaved_Pre 与 LST 呈强负相关。Coniferous_Pre 在春季与 LST 呈强正相关，而在夏季展现出了负相关性；到了秋季，Coniferous_Pre 则失去了显著相关性。Mixed_Per 仅在夏季与 LST 呈现显著相关性，在寒冷季节与 LST 均无显著相关性。由此可见，从春季到夏季再到秋季，随着温度的降低，城市森林景观组成指标与 LST 显著相关的数量逐渐减少。

表征城市森林景观配置和多样性的指标在春季最为明显。大多数情况下，城市森林的 LPI、PARA_MN、LSI、COHESION、AI 和 SPLIT 与 LST 呈负相关。特别是 LPI、COHESION 以及 AI 在春季和夏季呈现强负相关性关系。秋季的景观配置和多样性指标未通过显著性检验，与 LST 无显著相关性。

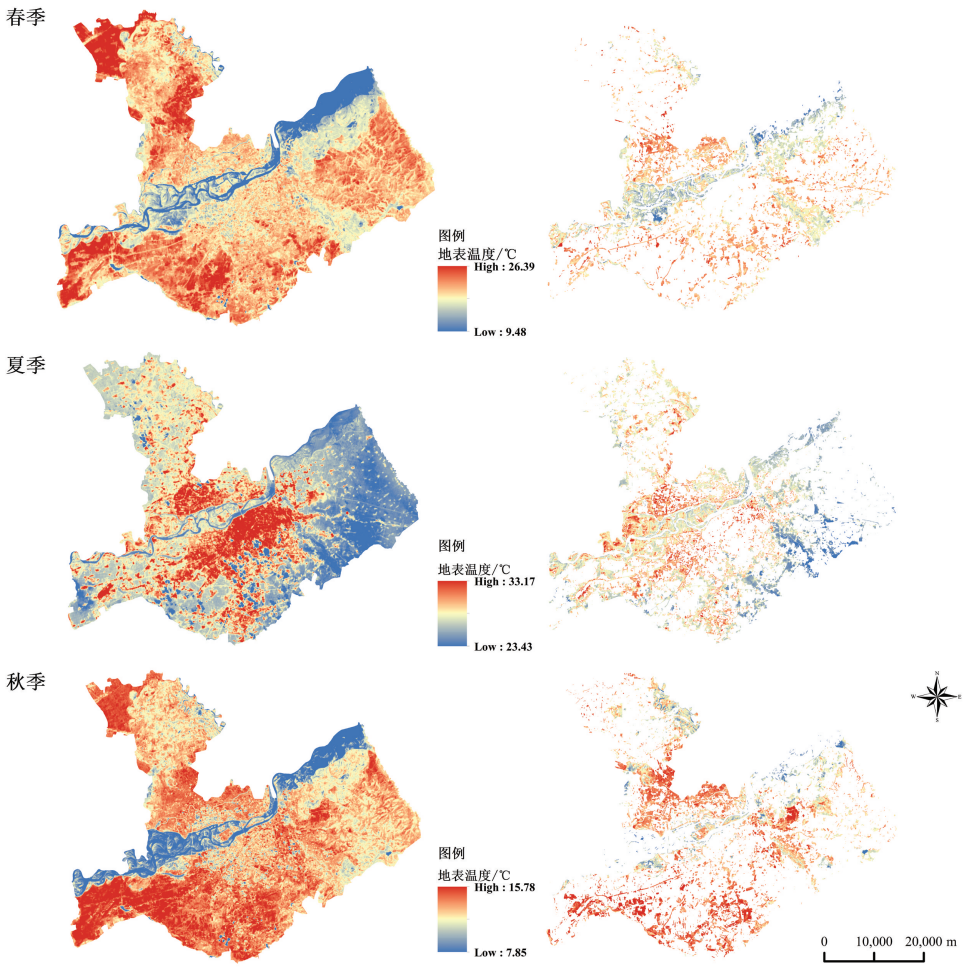


图 3　研究区整体 LST 空间分布（左）和研究区城市森林覆盖区 LST 的季节空间变化（右）

表 3　城市森林景观 LST 的描述性统计

城市森林类型	春季		夏季		秋季	
	均值/℃	标准差	均值/℃	标准差	均值	标准差
草地	18. 46	2. 69	28. 10	2. 02	13. 52	1. 68
针叶林	19. 86	2. 21	28. 11	2. 15	13. 11	1. 17
阔叶林	19. 40	2. 26	28. 27	1. 81	13. 40	1. 44
针阔混交林	18. 50	1. 84	28. 60	2. 16	13. 89	1. 08

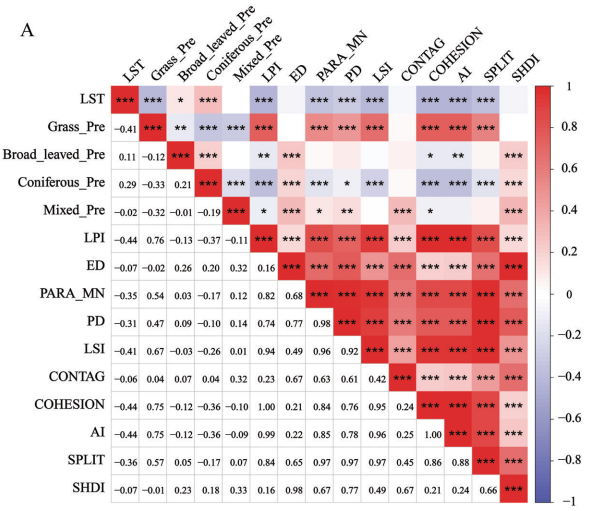
3. 3. 2　城市森林景观对 LST 影响的复合解释模型的季节性变化

各季节景观指标全子集回归模型的结果如图 5 所示，4 个解释变量（LPI、ED、PARA_MN 和 CONYAG）进入春季最佳模型。夏季时期，LPI、ED、PARA _ MN、LSI、CONTAG、COHESION、AI、SPLIT 和 SHDI 进入回归模型，然而夏季最佳回归模型中 AIC 值最小的模型没有景观指标进入回归模型。因此，选择仅大于其的 AIC 值为 6959. 99 的回归模型进行分析，该模型包含 AI 一个影响因素，调整后的 R^2 值 0. 03。对于秋季，最佳模型包含的解释变量为 Grass_Per、Mixed_Per、ED 以及 LSI。在寒冷季节最优模型中包含的解释变量数量较多，而炎热的夏季所包含的景观解释变量最少。

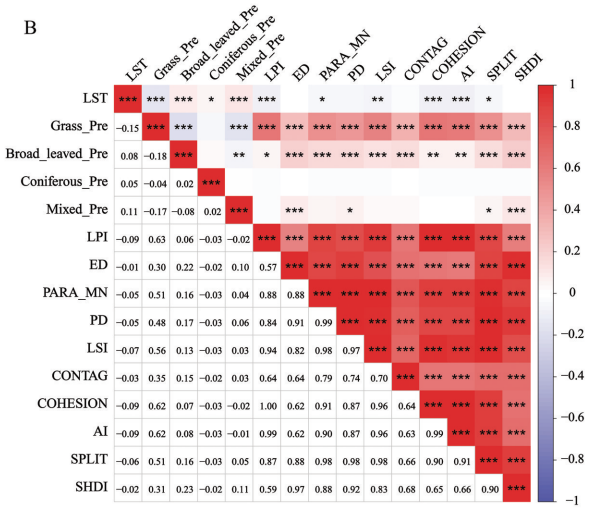
4　讨论

4. 1　不同季节城市森林景观与 LST 的相关关系

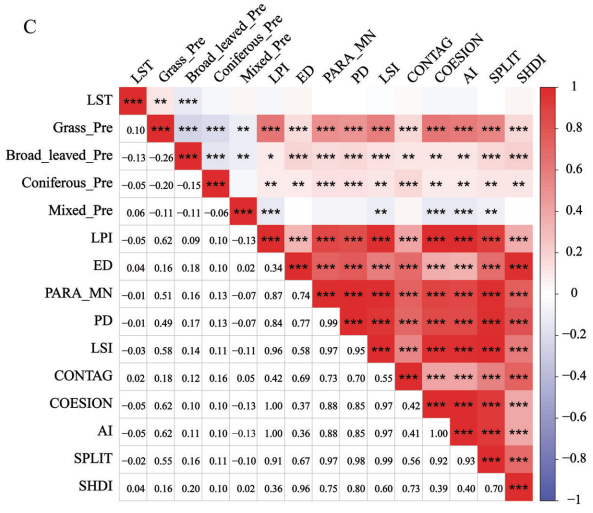
如图 4 所示，4 种类型林地景观均与 LST 呈显著相关性。其中，阔叶林、针叶林和针阔混交林景观组成与 LST 呈显著的正相关；与 LST 呈显著负相关的是草地景观，这是由于 LST 升高加速



A 春季景观指标与LST相关性热图



B 春夏季景观指标与LST相关性热图



C 秋季景观指标与LST相关性热图

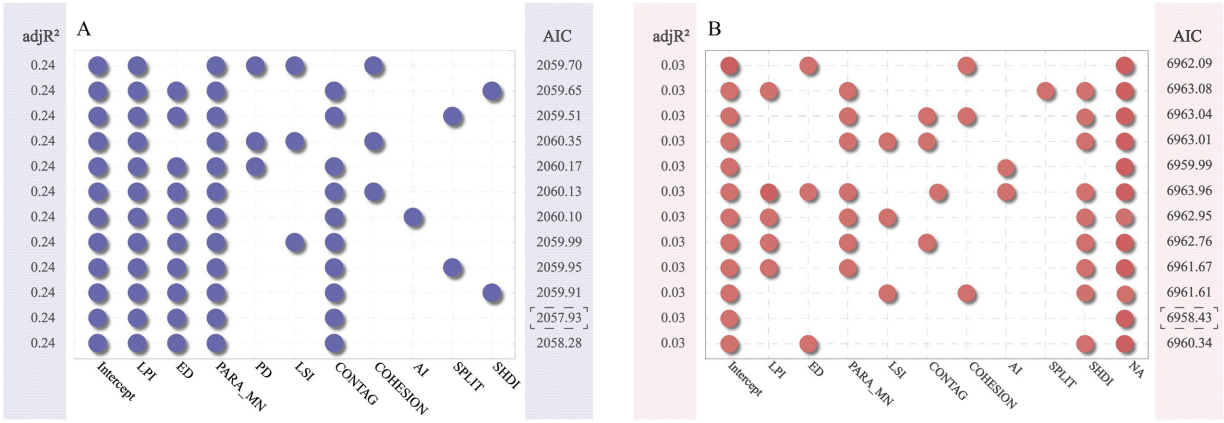
注：* 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$，*** 表示 $P<0.001$。

图 4 不同季节城市森林景观指标与 LST 相关性矩阵

了土壤水分蒸发，抑制草地斑块内部植被的生长，LST 成为影响草地景观斑块中植被生长的限制性因子[11]。在春季时期，由于气候寒冷干燥，林地景观以针叶林与草地为主，因此当 LST 升高时针叶林景观组成显著增大；草地景观组成与 LST 呈显著负相关，这可能是由于 LST 升高导致植被缺水，影响草地斑块内部植被生长。秋季时期，草地与 LST 呈正相关，说明 LST 的提升有助于草地植被的生长；阔叶林与 LST 呈显著负相关，LST 成为了影响了阔叶林的生长限制因子。

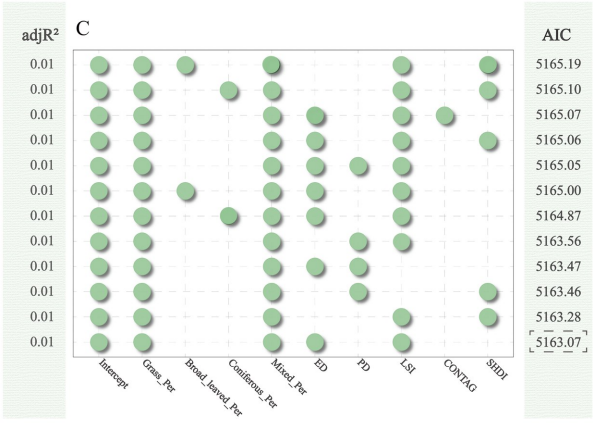
4.2 城市森林景观对 LST 影响的季节差异

随着季节进入了寒冷时期，LST 呈下降趋势，能够进入全子集回归模型的城市森林景观指标数量增加，这与 Peng 等[23]的研究结果相似。同时，研究发现：越是温暖的季节，景观指标对 LST 的变化的响应越明显；与景观组成指标相比，景观配置和多样性指标能综合解释 LST 的变化。此外，草地以及针阔混交林的面积占比指标进入了 LST 变化的最佳解释模型，景观组成因子在秋季时期对 LST 变化的响应最为显著。Yin 等[24]的研究也有类似的发现，草地和针阔混交林对 LST 的响应更加明显。当过渡到温度较低、降水减少的时期，森林景观逐渐减少，针叶林开始逐渐替代阔叶林成为优势景观。秋季时期，针叶林是发挥生态功能的主要力量，但其的叶面积和林地覆盖度都逊色于阔叶林，且阔叶林景观密集的枝干能够降低



A 春季全子集回归结果

B 夏季全子集回归结果



C 秋季全子集回归结果

注：横轴表示通过显著性检验的解释变量，回归模型中的截距项为“截距”；彩色的点表示有一个变量进入了回归模型；左边的 Adj R^2表示回归模型对 LST 变化的解释率；右边的 AIC 表示回归模型的 AIC 值；矩形代表各季节的最佳解释模型。

图 5　各季节的全子集回归结果

风速、维持周围环境温度、缓解严寒气候城市的冷压力，为城市环境温度的平衡做出了积极的贡献。

4.3　结合多个角度和学科知识选取城市森林景观指数

本文通过最优解释模型探讨了寒地城市森林景观组成和配置对于 LST 的影响作用强度。由于城市森林景观生态系统是生态自然、社会经济和文化共同组成的综合系统，城市森林景观的可达性通常由收入、种族、年龄、性别、能力和其他差异高度分层，森林生态环境与城市发展之间存在着复杂的非线性耦合关系。因此。对于城市森林景观指数的选取应结合多个角度和学科知识，包括生态、社会、经济、人文等多个领域指数，实现综合分析、全面评价。此外，还可以考虑更高分辨率的遥感图像以显示城市森林景观空间特征细节的辅助信息，如植被的生长状况、树种和湖泊/河流的水深等。

5　结论

寒冷季节，哈尔滨市城市森林景观平均温度最高的分别是针叶林和针阔混交林。夏季时期，平均温度最低的是草地斑块，形成了凉爽的环境条件。同时，研究区夏季时期 4 种类型林地景观面积均与 LST 呈显著相关性，其中阔叶林、针叶林和针阔混交林景观面积与 LST 有显著的正相关，与 LST 呈显著负相关的是草地景观面积；在春季时期，LST 与针叶林景观面积存在显著正相关；草地景观面积与 LST 呈显著负相关；秋季时期，草地斑块面积与 LST 呈正相关，阔叶林面积与 LST 呈显著负相关。随着季节进入寒冷时期决定 LST 变化的影响机理变得更加复杂，更多的景观

指数因子进入了回归模型中。城市森林景观的形状、连通性或多样性指数进入了各个物候时期的最佳解释模型。因此，注重优化城市森林的植被配置和城市森林景观结构特征是更加可行的方式：一方面，应针对当前较零散的林地斑块进行修整以增加其形状的复杂性，促进零散的森林景观斑块聚集形成良好的连接性，使其成为城市森林景观格局变化中的优势斑块类型；另一方面，丰富城市森林植被的种类配置，构建乔灌草组合搭配的植物群落结果，能有效发挥城市森林生态服务功能。

参考文献

[1] KANG Y, KIM E J. Differences of restorative effects while viewing urban landscapes and green landscapes[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2129.

[2] KUMARI P, GARG V, KUMAR R, et al. Impact of urban heat island formation on energy consumption in Delhi[J]. Urban Climate, 2021, 36: 100763.

[3] REN Z B, FU Y, DONG Y L, et al. Rapid urbanization and climate change significantly contribute to worsening urban human thermal comfort: a national 183-city, 26-year study in China[J]. Urban Climate, 2022, 43: 101154.

[4] FEDERER C A. Solar radiation absorption by leafless hardwood forests[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 3-20.

[5] 周寅桥，邵明，李雄. 基于 Landsat-8 遥感影像的扬州市城市公园夏季温湿效应[J]. 中国城市林业，2023，21(5)：114-123.

[6] 樊柏青，刘东云，李丹宁，等. 北京市六环内区域城市绿地对地表温度降温效益的差异性[J]. 中国城市林业，2022，20(4)：43-50.

[7] CHEN A L, YAO X A, SUN R H, et al. Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(4): 646-654.

[8] FILGUEIRAS R, MANTOVANI E C, ALTHOFF D, et al. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature[J]. Engenharia Agrícola, 2019, 39: 23-32.

[9] QIAO Z, LIU L, QIN Y W, et al. The impact of urban renewal on land surface temperature changes: a case study in the main city of Guangzhou, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(5): 794.

[10] CHEN D S, ZHANG F, ZHANG M R, et al. Landscape and vegetation traits of urban green space can predict local surface temperature[J]. Science of the Total Environment, 2022, 825: 154006.

[11] ZHUANG Q W, WU S X, YAN Y Y, et al. Monitoring land surface thermal environments under the background of landscape patterns in arid regions: a case study in Aksu River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136336.

[12] HU Y F, DAI Z X, GULDMANN J M. Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: a boosted regression tree approach[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266: 110424.

[13] 张波，王文杰，何兴元，等. 哈尔滨城市森林遮荫和降温增湿效应差异及其影响因素[J]. 生态学杂志，2017，36(4)：951-961.

[14] ZHANG Z J, LI X X, LIU H G. Biophysical feedback of forest canopy height on land surface temperature over contiguous United States[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(3): 034002.

[15] 张彪，谢紫霞，高吉喜，等. 上海市绿地植被的吸热降温效益评估[J]. 自然资源学报，2021，36(5)：1334-1345.

[16] 李梦颖，邢艳秋，刘美爽，等. 基于支持向量机的 Landsat-8 影像森林类型识别研究[J]. 中南林业科技大学学报，2017，37(4)：52-58.

[17] WANG L, LU Y, YAO Y L. Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from landsat 8 images[J]. Sensors, 2019, 19(22): 5049.

[18] WANG F, QIN Z H, SONG C Y, et al. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval fromlandsat 8 thermal infrared sensor data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4268-4289.

[19] QIN Z, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719-3746.

[20] VOGT J. Urban forests: biophysical features and benefits[M]// GOLDSTEIN M I, DELLASALA D A. Encyclopedia of the World's Biomes. Amsterdam: Elsevier, 2020.

[21] 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.

[22] SUN R H, CHEN L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands: mitigation and diversification[J]. Ecosystem Services, 2017, 23: 38-46.

[23] PENG J, JIA J L, LIU Y X, et al. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 215: 255-267.

[24] YIN J, WU X X, SHEN M G, et al. Impact of urban greenspace spatial pattern on land surface temperature: a case study in Beijing metropolitan area, China[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(12): 2949-2961.