

DOI: 10.20103/j.stxb.202411112749

范俊涛, 李硕涵, 张文龙, 张帆, 高瑞阳, 张守红. 北方城市社区绿地景观格局特征及其影响因素研究. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Fan J T, Li S H, Zhang W L, Zhang F, Gao R Y, Zhang S H. Landscape pattern characteristics and influencing factors analysis of urban community green space in northern China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

北方城市社区绿地景观格局特征及其影响因素研究

范俊涛¹, 李硕涵¹, 张文龙^{2,3}, 张帆^{1,4}, 高瑞阳¹, 张守红^{1,4,5,6,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070

3 湖北省水土保持工程技术研究中心, 武汉 430070

4 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083

5 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 临汾 042200

6 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083

摘要:城市社区绿地既是居民重要的日常休闲场所,也兼具重要生态和景观价值。明晰城市社区绿地景观格局特征及其关键影响因素是提升社区绿地生态功能、质量和效益的重要基础,然而目前尚缺乏该方面的研究。基于此,研究选取了我国北方 6 个典型城市(北京、青岛、西安、沈阳、西宁和迁安)的 35 个不同类型社区,通过实地调查和多源遥感影像解译,采用景观指数、因子分析与偏最小二乘法,构建了反映社区绿地景观格局特征的综合指标(景观格局综合指数),分析了不同城市 and 不同类型社区绿地景观格局现状,并解析了北方城市社区绿地景观格局的关键影响因素。结果表明:(1)所调查北方城市社区绿地景观多样性、聚集度、斑块大小、连通性、数量和形状复杂度均无显著性差异($P>0.05$)。高档新建社区绿地聚集度、斑块大小、连通性和数量显著高于普通老旧小区($P<0.05$)。(2)不同城市社区绿地景观格局综合指数从大到小分别为青岛、北京、西宁、迁安、沈阳、西安;在不同类型社区间表现为高档新建>普通新建>高档老旧>普通老旧小区。(3)建筑密度、建成时间、人均 GDP 和社区面积等社会经济指标是影响社区绿地景观格局综合指数的主要因素,海拔、降水量、气温等自然因素的影响相对较小。研究结果可为我国北方城市社区绿地景观格局优化与生态服务功能提升提供科学依据。

关键词:北方城市;社区绿地;景观格局;综合指数;影响因素

Landscape pattern characteristics and influencing factors analysis of urban community green space in northern China

FAN Juntao¹, LI Shuohan¹, ZHANG Wenlong^{2,3}, ZHANG Fan^{1,4}, GAO Ruiyang¹, ZHANG Shouhong^{1,4,5,6,*}

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan Hubei 430070, China

3. Hubei Engineering and Technology Research Center of Soil and Water Conservation, Wuhan 430070, China

4 National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Trees, Beijing 100083, China

5 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Linfen 042200, China

6 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

Abstract: Urban community green spaces are not only important daily leisure places for residents but also possess significant ecological and landscape value. Clarifying the characteristics of community green space landscape patterns and their key influencing factors is crucial for improving the ecological functions, quality, and benefits of community green spaces. However, few studies focused on this topic. Based on this, this study selected 35 different types of communities in

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF1303101)

收稿日期:2024-11-11; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangs@bjfu.edu.cn

six typical northern Chinese cities (Beijing, Qingdao, Xi'an, Shenyang, Xining, and Qian'an). Through field surveys and multi-source remote sensing image interpretation, landscape indices, factor analysis, and partial least squares methods were applied to construct a comprehensive indicator reflecting the characteristics of community green space landscape patterns (the Comprehensive Landscape Pattern Index, CLPI). The current conditions of green space landscape patterns in different cities and community types were analyzed, and the key influencing factors of green space landscape patterns in northern urban communities were identified. The results showed that: (1) There were no significant differences in the diversity, aggregation, patch size, connectivity, quantity, and shape of green space landscapes among the surveyed northern cities ($P > 0.05$). However, for different types of communities, the green space aggregation, patch size, connectivity, and quantity in high-end newly-built communities were significantly higher than those in ordinary old communities ($P < 0.05$). (2) The CLPI rankings across cities were: Qingdao > Beijing > Xining > Qian'an > Shenyang > Xi'an; among community types, the rankings were: high-end newly-built > ordinary newly-built > high-end old > ordinary old communities. (3) Socioeconomic indicators such as building density, community completion date, per capita GDP, and community area are main factors influencing the CLPI, while natural factors such as altitude, precipitation, and temperature had relatively minor impacts. The research results provided a scientific basis for optimizing the landscape patterns of urban community green spaces and enhancing their ecological service functions in northern China.

Key Words: northern cities; community green spaces; landscape pattern; comprehensive index; influencing factors

随着城市化进程推进,人民群众对生活环境品质要求日益提高^[1]。社区绿地作为城市生态系统重要组成部分^[2],是居民日常休闲娱乐与观赏景观的重要场所^[3]。已有研究表明,社区绿地在降低噪音^[4]、减轻城市热岛效应^[5]、调节水文循环^[6]、保护生物多样性^[7]等方面发挥着重要作用。然而,过去 40 多年快速城市化进程中,社区绿地多种生态功能未受到充分重视^[8],导致社区热辐射增强、内涝多发、生物多样性低等问题,难以满足居民多维需求^[9]。社区绿地景观格局决定其生态功能^[10],研究表明,绿地破碎度上升往往意味着其生物多样性保护功能衰退与降温效应减弱^[11],而斑块连通性不足会阻碍生态系统代谢过程,影响生态系统稳定性和功能^[12],因而明晰社区绿地景观格局特征及其影响因素是当前亟待解决的关键问题。

景观指数是绿地景观格局分析的重要手段,涵盖斑块面积、形状和聚集度等内容^[13],因其参数易获取与计算简便的优势而被广泛应用于城市绿地景观格局分析^[14]。虽然当前有较多可用于表征景观格局的指数,但众多景观指数之间存在着相互关联和信息冗余^[15],这可能导致分析结果出现偏差。针对这一问题,国内外研究人员开展了一系列研究工作,如何鹏等^[16]和田晶等^[17]运用因子分析方法有效解决了森林和城市景观格局分析中景观指数信息冗余问题。故本文结合相关性分析与因子分析方法构建城市社区绿地景观格局综合指数,以减少多个景观指数分析过程中的冗余信息。

识别城市社区绿地景观格局特征关键影响因素,对提升社区生态环境质量有重要意义^[18]。目前,已有许多研究从城市尺度解析了绿地景观格局关键影响因素。例如,Wu 等^[19]分析了上海市 1980—2015 年城市尺度绿地时空变化及其驱动力。赵海霞等^[20]通过空间分析方法揭示了南京市 2000—2015 年绿地景观格局变化特征及其演变机理。许浩等^[21]运用偏最小二乘回归(PLSR)模型探究了社会经济和自然因素对南京市域绿地景观格局演变的影响。Yin 等^[22]利用景观指数和热点分析等方法探讨了杭州市 2017—2021 年不同土地利用变化条件下城市绿地景观格局变化规律。Yan 等^[23]利用景观指数分析了北京市住宅绿地变化及其与社区特征的关系。然而,目前研究大多聚焦某个城市绿地,缺少跨城市区域性研究,区域尺度城市社区绿地景观格局影响因素不清晰。我国北方城市在降水、气温、地形地貌、人口和产业结构等方面差异明显^[24],北方城市社区绿地景观格局有何特征,各要素如何影响景观格局变化等问题亟待深入研究。

基于此,本研究选取了我国北方 6 个典型城市(北京、青岛、西安、沈阳、西宁和迁安)35 个社区(涵盖高档新建、普通新建、高档老旧和普通老旧 4 种类型)作为研究对象,通过景观指数定量分析社区绿地景观格局特

征,基于相关性分析和因子分析方法构建了更为简洁的景观格局综合指数,并进一步利用偏最小二乘回归模型从自然条件和社会经济等维度分析北方城市社区绿地景观格局关键影响因素。研究结果可为我国北方城市社区绿地景观格局优化与生态服务功能提升提供科学参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

本研究综合考虑地理位置、地形地貌、气候特征、经济发展水平以及人口规模等多重因素,选取了北京、青岛、西安、沈阳、西宁和迁安 6 个具有代表性的北方城市作为研究对象(表 1)。这些城市不仅体现了从高原至平原、由沿海到内陆的气候与地理多样性,还体现了从高度发达至发展适中的经济梯度变化,以及人口规模从大到小的不同层级,能够全面揭示北方地区在自然、社会和经济等多个维度上的多样性和复杂性。

表 1 所选代表性城市基本信息

Table 1 Basic information of selected representative cities

城市 City	地理位置 Geographical location	地形地貌 Landform	年平均 降水量/mm Annual average precipitation	年平均 气温/℃ Annual average temperature	常住人口/万人 Resident population	地区生产 总值/亿元 Gross domestic product
北京	39°57'33"N, 116°17'53"E	华北平原	507.22	13.38	2184	41611
青岛	36°03'58"N, 120°22'57"E	渤海之滨	678.49	11.96	1034	14921
西安	34°20'29"N, 108°56'23"E	关中平原	552.06	15.03	1300	11487
沈阳	41°48'20"N, 123°25'53"E	浑河中下游	699.68	8.78	915	7696
西宁	36°37'01"N, 101°46'41"E	黄土高原边缘	452.99	5.84	248	1644
迁安	39°59'57"N, 118°42'06"E	太行山东麓	566.34	12.13	78	1281

常住人口数和 GDP 数据来自各城市 2022 年统计年鉴

采用随机抽样方法,从每个城市建成区抽取 12 个社区作为研究样本。在借鉴李红等^[25]社区分类方法基础上,综合考虑建成时间、房价层次、周边服务设施数量等因素,对所选取社区进行分类。最终,确定 35 个社区作为研究对象,其中包括 9 个高档新建、9 个普通新建、6 个高档老旧和 11 个普通老旧社区(见表 2)。具体分类标准如下:①参照 2024 年 6 月安居客网(<https://www.anjuke.com/>)房价数据,将社区房价与所在区县平均房价之比作为房价层次指标,并结合社区周边服务设施数量(如地铁站、学校等),将社区分为高档和普通社区。②根据《国务院办公厅关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》等相关文件,划分 2000 年底前建成社区为老旧社区,2000 年底后建成社区为新建社区。

1.2 数据来源

实测数据来源于 2023 年 6 月至 8 月对我国北方 35 个社区实地调查。调查过程中,以目标社区遥感影像图为基础,结合实际情况,测量、勾绘建筑、水体、绿地等的边界,并拍摄照片和视频,为后期目视解译及纠偏提供数据资料支撑。同时,通过样方法调查了各个社区绿地物种组成和植物生长状况等信息,用以评估社区绿地景观格局现状。

遥感影像数据均来源于 Bigemap 卫星地图软件(<http://www.bigemap.com/>)。为了准确获取各社区内绿色植被覆盖情况,选取了 GCS_WGS_1984 地理坐标系下、植被茂盛时期的高分辨率(0.6m)遥感影像。结合实地调查获取社区照片和视频资料,通过目视解译方法^[26],在 AutoCAD 软件中勾画出社区整体布局,包括绿地、建筑物、铺装地面、道路以及水体等边界,并使用 ArcGIS 10.7 制作社区绿地栅格图,导入 Fragstats 4.2 计算景观指数。

社区绿地景观格局影响因素选取参考 Wu 等^[27]和李方正等^[28]的研究,同时结合社区绿地特征及数据可获得性,将社区绿地景观格局影响因素划分为 6 个社会经济因素和 3 个自然因素(表 3)。社会经济影响因素数据主要来源于安居客网、城市统计年鉴,自然影响因素数据来源于中国气象数据网和实地测量。

表 2 调查社区基本信息表

Table 2 Basic information of investigated communities

类型 Category	序号 ID	名称 Name	房价层次 Price levels	建成时间 Completion date	地区 City
高档新建(N=9) High-end new	1	广汇九锦园(南区)	1.30	2019	西宁
	2	山水溪墅	1.67	2017	西安
	3	方大胜景	1.56	2017	沈阳
	4	美好愿景	1.05	2016	沈阳
	5	上东水郡	1.10	2013	迁安
	6	广场君府	1.18	2013	迁安
	7	雅荷春天	1.61	2011	西安
	8	福临万家(一期)	1.20	2011	青岛
	9	翠海依居	1.11	2006	青岛
普通新建(N=9) Ordinary new	10	八家嘉园	0.83	2014	北京
	11	船院社区	0.77	2014	青岛
	12	苏新社区	0.52	2012	迁安
	13	城南花苑	0.83	2009	西宁
	14	邮运局家属院	0.95	2008	西宁
	15	河畔人家	0.94	2006	迁安
	16	逸成东苑	1.08	2006	北京
	17	泰和园	0.94	2004	西宁
	18	海北社区	0.89	2005	西宁
高档老旧(N=6) High-end old	19	电信十所家属院	1.29	2000	西安
	20	金海湾	1.01	1998	青岛
	21	宝环社区	1.22	1995	沈阳
	22	农科院社区	1.18	1972	北京
	23	柏儒苑	0.81	1998	北京
	24	兴安社区	0.85	2002	迁安
普通老旧(N=11) Ordinary old	25	合厚社区	0.89	2000	沈阳
	26	燕春社区	0.79	2000	迁安
	27	双玉新苑	0.76	2000	青岛
	28	东王庄社区	0.88	1998	北京
	29	邮政局家属院	0.81	1998	西宁
	30	科育社区	1.18	1985	北京
	31	和谐军休家园	0.97	1996	西安
	32	园林局职工宿舍	0.79	1995	青岛
	33	西五路 109 院	2.56	1995	西安
	34	红星社区	0.97	1992	沈阳
	35	常青社区	0.72	1992	迁安

表 3 社区绿地景观格局特征影响因素

Table 3 Factors influencing the landscape pattern characteristics of community green spaces

类别 Category	编号 Number	名称 Name	单位 Unit	数据来源 Data source
社会经济因素 Socioeconomic factors	1	建筑密度	%	利用 GIS 软件对 35 个社区遥感影像数据描述统计分析得到
	2	社区面积	hm ²	
	3	建成时间	a	
	4	人均 GDP	元	
	5	房价层次	NA	
	6	物业费	元 m ⁻² 月 ⁻¹	
自然因素 Natural factors	7	海拔	m	实地测量
	8	年平均降水量	mm	中国气象数据网(https://data.cma.cn/)
	9	年平均气温	℃	

人均 GDP 为社区建成当年所在城市人均 GDP, 建筑密度指社区内建筑占地面积与总面积的比例

2 研究方法

2.1 景观指数

本文利用景观指数分析方法对社区绿地景观格局进行初步评估。结合前人研究^[12,27],选取了景观水平 6 类 15 个景观指数(表 4),用以描述北方城市社区绿地景观格局特征。

表 4 景观指数说明表

Table 4 Explanation of landscape indices

类别 Category	景观指数 Landscape index	计算公式 Formula	生态学意义及公式描述 Formula description
多样性 Diversity	辛普森均匀度指数(SIEI)	$SIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m p_i^2}{1 - \left(\frac{1}{m}\right)}$	反映景观分布均匀程度。 p_i 为第 i 类景观占整体景观的比例, $i=1, \dots, m$,表示斑块类型(下文同义)。
	辛普森多样性指数(SIDI)	$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2$	描述从一个群落连续两次抽样所得到的个体数属于同一种的概率。
	香浓均匀度指数(SHEI)	$SHEI = \frac{\sum_{i=1}^m p_i \times \ln p_i}{\ln(m)}$	反映景观中各斑块类型在面积上分布的均匀程度,其值越接近 1,景观分布越均匀。
	香浓多样性指数(SHDI)	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \times \ln p_i)$	反映景观异质性,特别对斑块类型的非均衡分布状况较为敏感。
聚集度 Aggregation	相邻百分比(PLADJ)	$PLADJ = \frac{g_{ii}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}}$	反映斑块类型的集聚程度。当景观由形状相对简单且规模较大的斑块构成时,PLADJ 值较高。 g_{ii} 基于单计数方法的斑块类型像元之间的相似连接的数量, g_{ik} 为基于双计数方法的斑块 i 和 k 之间的相似连接的数量。
	聚集度(AI)	$AI = \sum_{i=1}^m \left(\frac{g_{ii}}{\max g_{ii}} \right) p_i$	基于栅格数据测度景观的聚集程度。 $\max g_{ii}$ 为同类型斑块的像元间最大邻接数,当斑块类型的破碎度达到最大时,AI 等于 0。
斑块大小 Patch area	斑块平均面积(AREA_MN)	$AREA_MN = \frac{A}{N}$	斑块总面积除以斑块数,反映景观的破碎化程度。 N 为斑块总数, A 为景观总面积(下文同义)。
	斑块加权平均面积(AREA_AM)	$AREA_AM = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} \times \frac{a_{ij}}{A} \right)$	反映每个斑块的加权平均值面积。 $j=1, \dots, n$,表示斑块数目, a_{ij} 为第 i 类景观要素的第 j 个斑块的面积, A 为景观总面积(下文同义)。
连通性 Connectivity	平均欧几里得最近邻距离(ENN_MN)	$ENN_MN = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij}}{N}$	一般而言,ENN 值较大表明斑块间距离较远,分布较为离散;反之,则说明斑块间距离较近,呈团聚分布。 h_{ij} 为斑块 ij 到最近同类斑块之间直线距离(下文同义)。
	边缘密度(ED)	$ED = \frac{E}{A}$	景观的总边缘长度除以景观总面积,体现斑块被边界分割的程度。 E 为斑块边缘的总长度。
	面积加权欧几里得距离(ENN_AM)	$ENN_AM = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(h_{ij} \times \frac{a_{ij}}{A} \right)$	斑块间面积加权的欧几里得最近邻距离,值越高表示该类型斑块间越离散。
数量 Quantity	景观百分比(PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A}$	反映绿地占景观总体面积的比例。当该值为 100 时,说明整个景观仅包含绿地。
形状 Shape	面积加权分维数(FRAC_AM)	$FRAC_AM = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln a_{ij}} \times \frac{a_{ij}}{A} \right)$	描述斑块或景观镶嵌体的几何形状复杂程度。
	平均形状指数(SHAPE_MN)	$SHAPE_MN = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{ij}}{4 \sqrt{a_{ij}}} \right) / N$	描述景观尺度上斑块形状的变化。
	加权平均形状指数(SHAPE_AM)	$SHAPE_AM = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{ij}}{4 \sqrt{a_{ij}}} \times \frac{a_{ij}}{A} \right)$	反映斑块形状与等面积正方形的偏离程度。

2.2 相关性及因子分析

在现有相关研究^[29-30]基础上,本文利用相关性分析与因子分析方法构建社区绿地景观格局综合指数 (comprehensive landscape pattern index, CLPI),用以综合评估社区绿地景观格局特征。CLPI 计算方法分为以下 3 步:①计算各社区绿地景观指数;②标准化各社区绿地景观指数;③确定各景观指数的权重,计算 CLPI。

CLPI 及公因子 F_i 计算公式如下:

$$CLPI = \sum_1^i (F_i \times E_i / E)$$

式中, i 表示公因子数量; F_i 表示第 i 个公因子; E_i 表示公因子 F_i 贡献率; E 表示特征根大于 1 公因子累计贡献率。

$$F_i = \sum_1^j (S_j \times SD_j)$$

式中, j 表示景观指数数量; S_j 为第 j 个景观指数在公因子 F_i 上得分; SD_j 为第 j 个景观指数标准化后值。

2.3 偏最小二乘回归

利用偏最小二乘回归探究 6 城市 35 个社区绿地景观格局关键影响因素。使用 SIMCA-P 软件进行回归分析,将社区绿地景观格局综合指数作为因变量,9 个社会经济与自然因素作为自变量,对影响社区绿地景观格局特征主要因素进行主成分提取。同时,将 $Q^2 > 0.097$ 和 $R^2_Y > 0.5$ 作为 PLSR 模型主成分提取终止条件^[31],以确保模型的可靠性和预测性,避免过拟合。

3 结果与分析

3.1 社区绿地景观格局特征分析

北方典型城市 35 个社区绿地景观指数统计结果见表 5。多样性方面,调查社区绿地斑块面积分布相对均匀 (SIEI、SHEI 均值为 0.57、0.59),多样性相对较好 (SHDI 均值为 0.65),但斑块类型丰富度 (SIDI 均值为 0.38) 仍有待提升。聚集度方面,调查社区绿地斑块聚集程度较高 (AI 均值为 94.68),相邻斑块之间连接性良好 (PLADJ 均值为 93.62)。斑块大小方面,调查社区绿地平均斑块面积相对较小 (AREA_MN 均值为 0.04),而加权平均斑块面积稍大 (AREA_AM 均值为 0.10),调查绿地中少数较大斑块与大量较小斑块并存。连通性方面,北方城市社区绿地斑块间距离适中 (ENN_MN 均值为 10.53、ENN_AM 均值为 10.60),边缘密度较高 (ED 均值为 906.79)。数量方面,北方城市社区绿地景观百分比较低 (PLAND 均值为 27.36)。从形状来看,北方城市社区绿地斑块形状相对规则 (FRAC_AM 均值为 1.23,SHAPE_MN 均值为 1.86,SHAPE_AM 均值为 2.24)。

表 5 北方城市社区绿地景观指数描述统计

Table 5 Descriptive statistics of green space landscape indices in northern urban communities

类别 Category	指数 Index	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Std. Dev.
多样性 Diversity	SIEI	0.00	1.00	0.57	0.27
	SIDI	0.00	0.61	0.38	0.18
	SHEI	0.00	1.00	0.59	0.25
	SHDI	0.00	1.12	0.65	0.30
聚集度 Aggregation	PLADJ	83.30	96.63	93.62	2.79
	AI	88.45	97.31	94.68	2.13
斑块大小 Patch area	AREA_MN	0.004	0.15	0.04	0.03
	AREA_AM	0.005	0.41	0.10	0.09
连通性 Connectivity	ENN_MN	2.73	30.54	10.53	7.06
	ENN_AM	2.60	35.09	10.60	7.65
	ED	287.73	1558.70	906.79	399.62
数量 Quantity	PLAND	3.74	57.49	27.36	15.50
形状 Shape	FRAC_AM	1.11	1.42	1.23	0.06
	SHAPE_MN	1.24	2.66	1.86	0.31
	SHAPE_AM	1.28	3.72	2.24	0.55

不同城市的社区绿地景观指数如图 1 所示,多样性(SIEI、SIDI、SHEI、SHDI)、聚集度(PLADJ、AI)、斑块大小(AREA_MN、AREA_AM)和连通性(ENN_MN、ENN_AM、ED)差异均不显著($P>0.05$),这表明不同城市间社区绿地在多样性、聚集度、斑块大小和连通性方面表现出较高相似性。但青岛和迁安社区绿地景观百分比(PLAND)差异显著($P<0.05$),青岛和西安的形状复杂度(SHAPE_AM)存在明显差异($P<0.05$)。这表明,尽管北方不同城市之间绿地景观指数整体上差异较小,但少数城市在个别指标上仍存在显著差异。

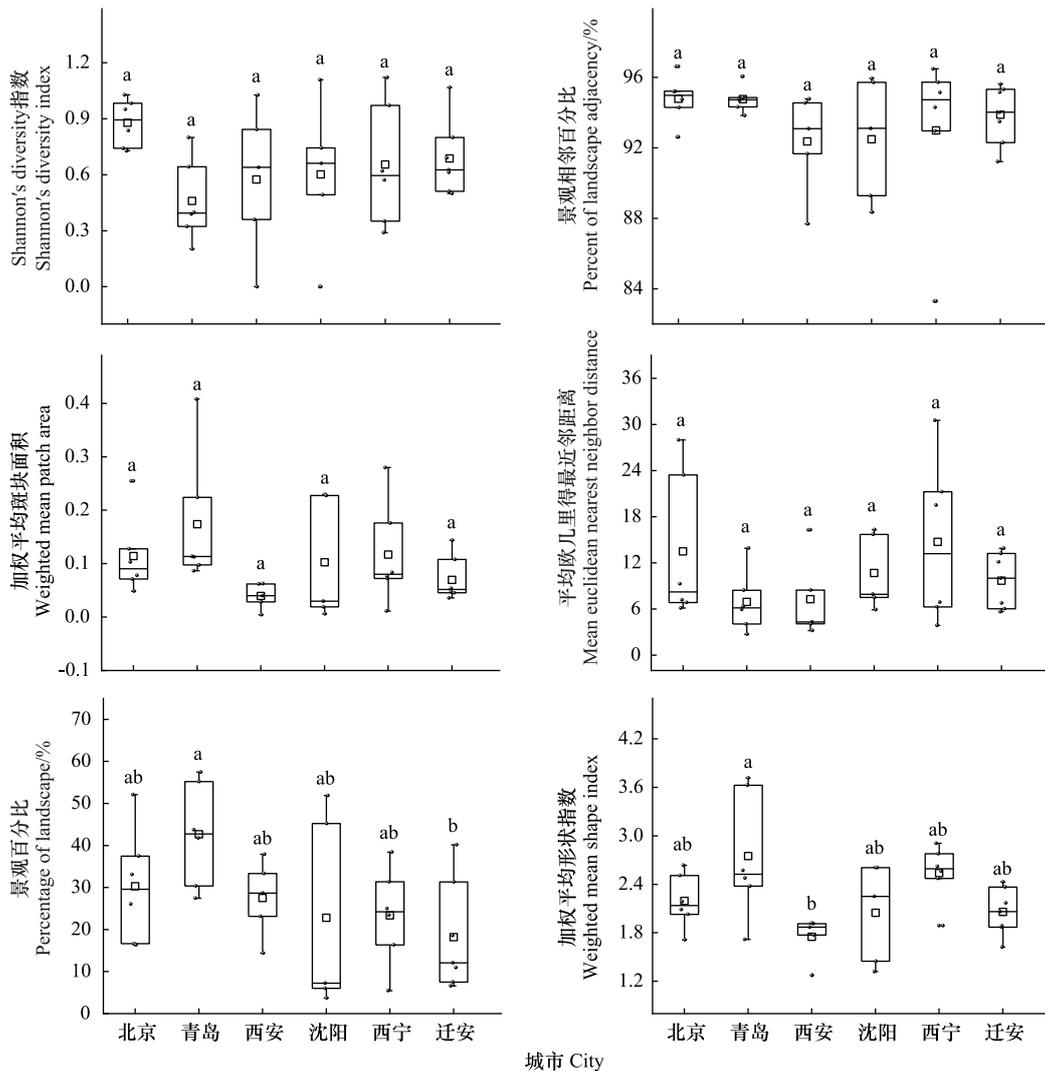


图 1 不同城市社区绿地景观指数

Fig.1 Green spaces landscape indices for different cities

受篇幅限制,仅从 6 类景观指数中各选 1 个展示

北方不同类型社区绿地景观指数如图 2 所示,景观指数 SIEI、SIDI、SHEI、SHDI、ED、FARC_AM、SHAPE_MN、SHAPE_AM 和 AREA_MN 差异均不显著($P>0.05$),表明北方城市不同类型社区绿地多样性和形状复杂度具有相似性。然而,高档新建社区绿地 PLADJ、AREA_AM 和 PLAND 显著高于普通老旧社区($P<0.05$),而 ENN_MN、ENN_AM 显著低于普通老旧社区($P<0.05$),但与普通新建社区和高档老旧社区的差异不显著($P>0.05$)。这说明北方城市高档社区绿地景观百分比较高,斑块较大且聚集,连通性较好。尽管不同类型社区的绿地聚集度指数在统计学上无显著差异,但高档新建社区的绿地聚集度指数均值仍分别高于普通新建、高档老旧和普通老旧社区。

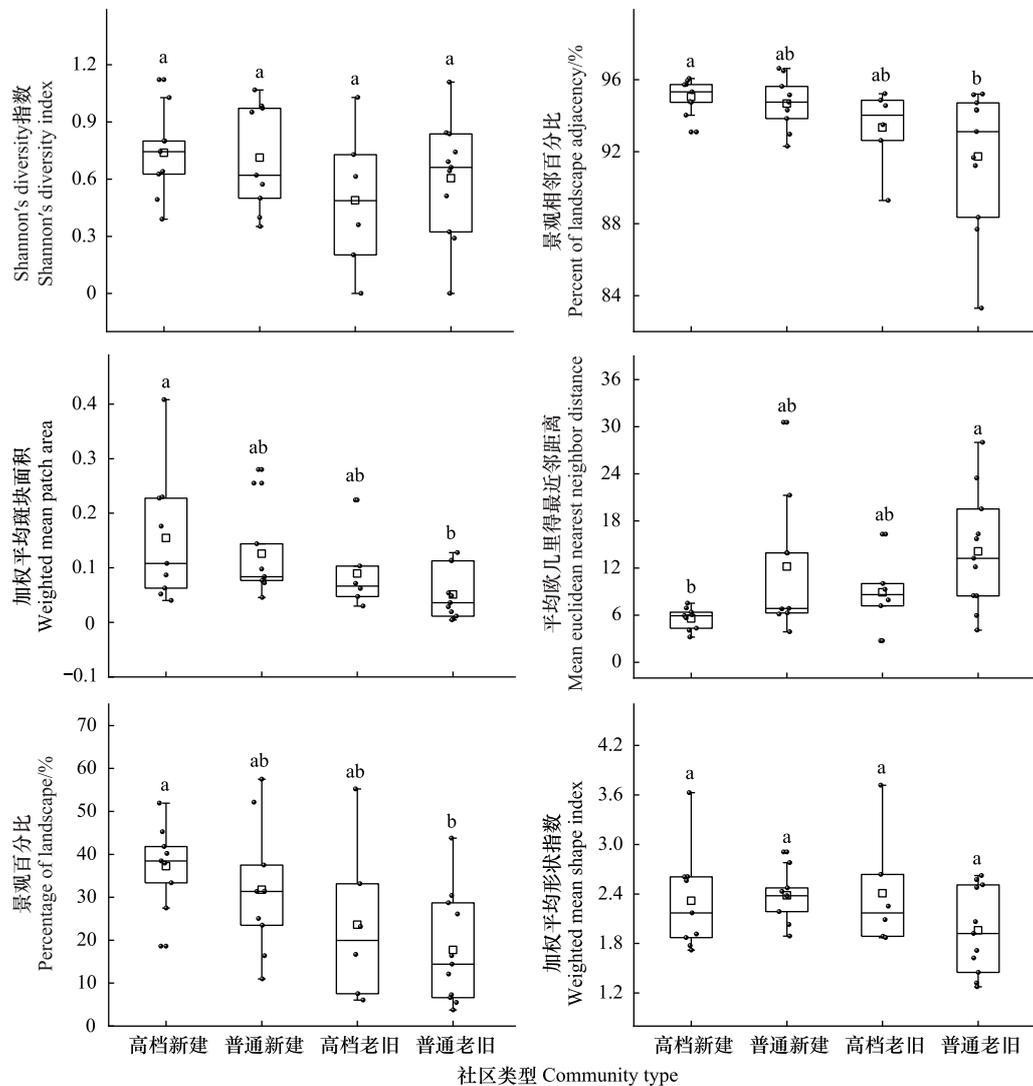


图2 不同类型社区绿地景观指数

Fig.2 Green spaces landscape indices for different types of communities

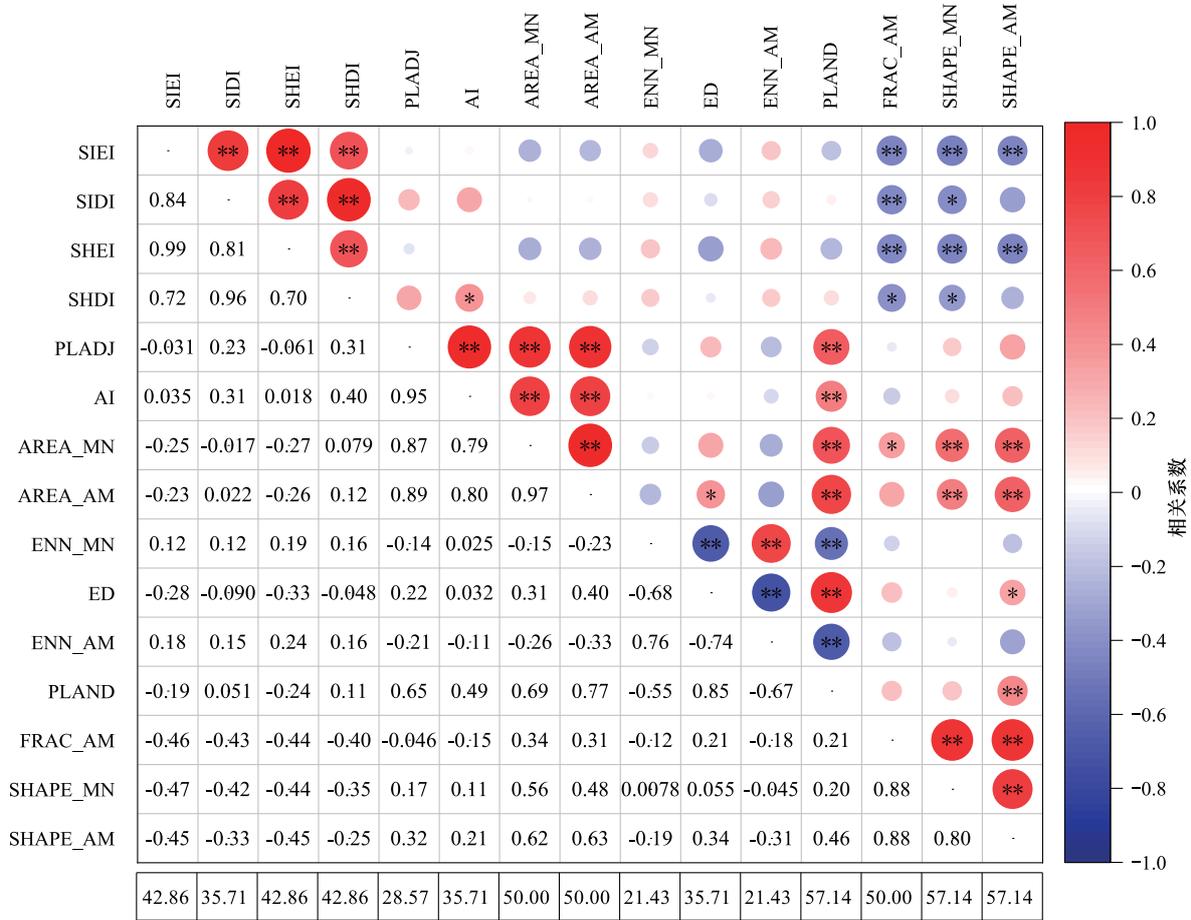
3.2 景观指数相关性及因子分析

15个景观指数相关性分析结果表明(图3),在5%显著性水平下,有9个景观指数两两间具有显著相关性比例超过40%,其中PLAND、SHAPE_MN、SHAPE_AM显著相关比例最高($P < 0.05$),达57.14%。这表明所选景观指数之间存在关联性,部分指数之间存在信息冗余和生态学意义重叠。

KMO和巴特利特检验结果显示,KMO值为0.532,Sig.值=0.000,表明15个景观指数适合做因子分析。图4为因子分析结果,可以看出前4个公因子特征根较大且对样本方差贡献和为87.54%,即提取前4个公因子对景观格局进行表征即可保留原始信息总量的87.54%。

旋转后的因子载荷如表6所示,第1公因子F1在SIEI、SIDI、SHEI、SHDI上具有较大载荷,可用于解释社区绿地景观的多样性,斑块类型越多,面积分布越均匀,多样性越高,其值越大。第2公因子F2在PLADJ、AI、AREA_MN、和AREA_AM上具有较高载荷,可用于表征绿地景观的平均斑块面积和聚集度,斑块面积大且分布集中的绿地景观聚集度较高。第3公因子F3在ENN_MN、ED、ENN_AM和PLAND上有较大载荷,可用于反映绿地数量、边缘密度及斑块间距离,绿地景观面积占比越高,边缘密度越大,斑块间距离越小,其值越大。第4公因子F4在FRAC_AM、SHAPE_MN和SHAPE_AM上载荷较高,用于表征绿地景观形状复杂度,形状越

复杂,其值越大。4 个公因子分别命名为绿地多样性、聚集度、数量及连通性和形状复杂度因子,共同构成社区绿地景观格局综合指数,用于表征北方城市社区绿地景观格局特征。综合指数越高,社区绿地类型越丰富,大型斑块较多、景观百分比较高、形状边缘更复杂及连通性更好,有利于发挥生态服务功能。



呈显著相关的比例/%

图3 景观指数相关性

Fig.3 Correlation of landscape indices

SIEI:辛普森均匀度指数;SIDI:辛普森多样性指数;SHEI:香浓均匀度指数;SHDI:香浓多样性指数;PLADJ:相邻百分比;AI:聚集度;AREA_MN:斑块平均面积;AREA_AM:斑块加权平均面积;ENN_MN:平均欧几里得最近邻距离;ED:边缘密度;ENN_AM:面积加权欧几里得距离;PLAND:景观百分比;FRAC_AM:面积加权分维数;SHAPE_MN:平均形状指数;SHAPE_AM:加权平均形状指数

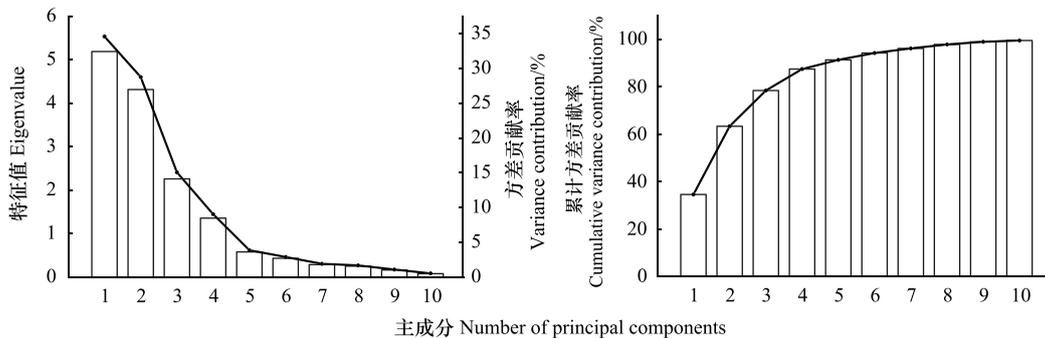


图4 因子分析的特征值、方差贡献率及累计贡献率

Fig.4 Eigenvalues, variance contribution rates, and cumulative contribution rates in factor analysis

表 6 景观指数的因子分析

Table 6 Factor analysis of landscape indices

项目 Item	旋转后的因子载荷矩阵 Factor loading matrix after rotation				因子得分矩阵 Factor score matrix			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
特征值 Eigenvalue	5.193	4.317	2.262	1.358				
贡献率 Contribution rate/%	25.44	25.31	18.60	18.18				
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	25.44	50.75	69.36	87.53				
SIEI	0.962*	-0.038	-0.074	-0.173	0.301	-0.076	0.032	0.104
SIDI	0.944*	0.154	-0.016	-0.204	0.273	-0.012	0.034	0.057
SHEI	0.938*	-0.072	-0.128	-0.115	0.304	-0.088	0.012	0.135
SHDI	0.879*	0.261	-0.041	-0.181	0.242	0.030	0.009	0.040
PLADJ	0.244	0.907*	0.147	-0.099	-0.017	0.279	-0.021	-0.136
AI	0.307	0.900*	0.045	-0.073	0.005	0.278	-0.058	-0.109
AREA_MN	-0.117	0.836*	-0.008	0.429	-0.042	0.232	-0.102	0.077
AREA_AM	-0.109	0.815*	0.157	0.382	-0.036	0.213	-0.032	0.055
ENN_MN	-0.013	0.104	-0.863*	-0.013	-0.068	0.129	-0.362	-0.017
ED	-0.144	0.210	0.857*	0.018	-0.017	-0.008	0.317	-0.056
ENN_AM	0.073	-0.099	-0.853*	-0.095	-0.033	0.064	-0.330	-0.013
PLAND	-0.044	0.616	0.681*	0.133	-0.011	0.120	0.207	-0.034
FRAC_AM	-0.227	-0.169	0.084	0.929*	0.123	-0.177	0.031	0.456
SHAPE_MN	-0.186	0.243	-0.036	0.840*	0.072	-0.017	-0.058	0.359
SHAPE_AM	-0.231	0.412	0.204	0.818*	0.049	0.022	0.019	0.313

F1:第1公因子 The first common factor;F2:第2公因子 The second common factor;F3:第3公因子 The third common factor;F4:第4公因子 The fourth common factor; * 表示景观指数在这一公因子载荷最大

3.3 社区绿地景观格局综合评估

图 5 所示为 35 个北方城市社区绿地景观格局综合指数,35 个社区得分为正的有 19 个,得分为负 16 个。景观格局综合指数得分较高的 5 个社区分别为西宁广汇九锦园(高档新建)、迁安苏新社区(普通新建)、青岛福临万家(高档新建)、沈阳美好愿景(高档新建)、北京八家嘉园(高档新建);得分较低 5 个社区分别为西安西五路 109 院(普通老旧)、沈阳宝环社区(高档老旧)、迁安常青社区(普通老旧)、西宁邮政局家属院(普通老旧)、西安电信十所家属院(高档老旧)。其中,西宁广汇九锦园社区(高档新建)得分最高(0.74),西安西五路 109 院社区(普通老旧)得分最低(-1.51),实地调查结果显示,广汇九锦园社区既有大型中心绿地斑块,也有宅旁绿地斑块,绿地种类丰富且分布聚集,而西五路 109 院社区仅有少量规则的宅旁绿地斑块,绿地斑块面积小且相互隔离。景观指数也显示西宁广汇九锦园社区绿地类型丰富,聚集度高,连通性好,而西安西五路 109 院社区绿地景观格局在各方面仍有很大提升空间,这表明绿地景观格局较优的社区,其景观格局综合指数得分高。此外,19 个景观格局综合指数得分为正的社区中包含 7 个高档新建、6 个普通新建、3 个高档老旧以及 3 个普通老旧社区,表明高档新建社区绿地景观格局优于普通新建、高档老旧和普通老旧社区。

如图 6 所示,不同城市间社区绿地景观格局综合指数无显著差异($P>0.05$)。但青岛、北京、西宁和迁安社区绿地景观格局综合指数均值为正,沈阳和西安为负,表明所调查城市社区绿地中,青岛市社区绿地景观格局更优,而西安市社区绿地景观格局则相对处于较低水平,这种空间异质性可能是因为城市发展历史和地理特点等存在差异。不同类型社区间,高档新建社区绿地景观格局综合指数最高,普通新建和高档老旧社区次之,普通老旧社区最低。具体而言,高档新建和普通新建社区绿地景观格局综合指数均值分别为 0.33 和 0.19,显著高于普通老旧社区(-0.36)($P<0.05$)。高档老旧社区绿地景观格局综合指数均值为-0.13,与其他三类社区之间无显著差异($P>0.05$)。这表明,高档新建社区绿地景观格局优于普通新建、高档老旧和普通老旧社区,与上文结果一致。从建成时间来看,高档新建社区绿地景观格局综合指数高于高档老旧社区,普通新建社

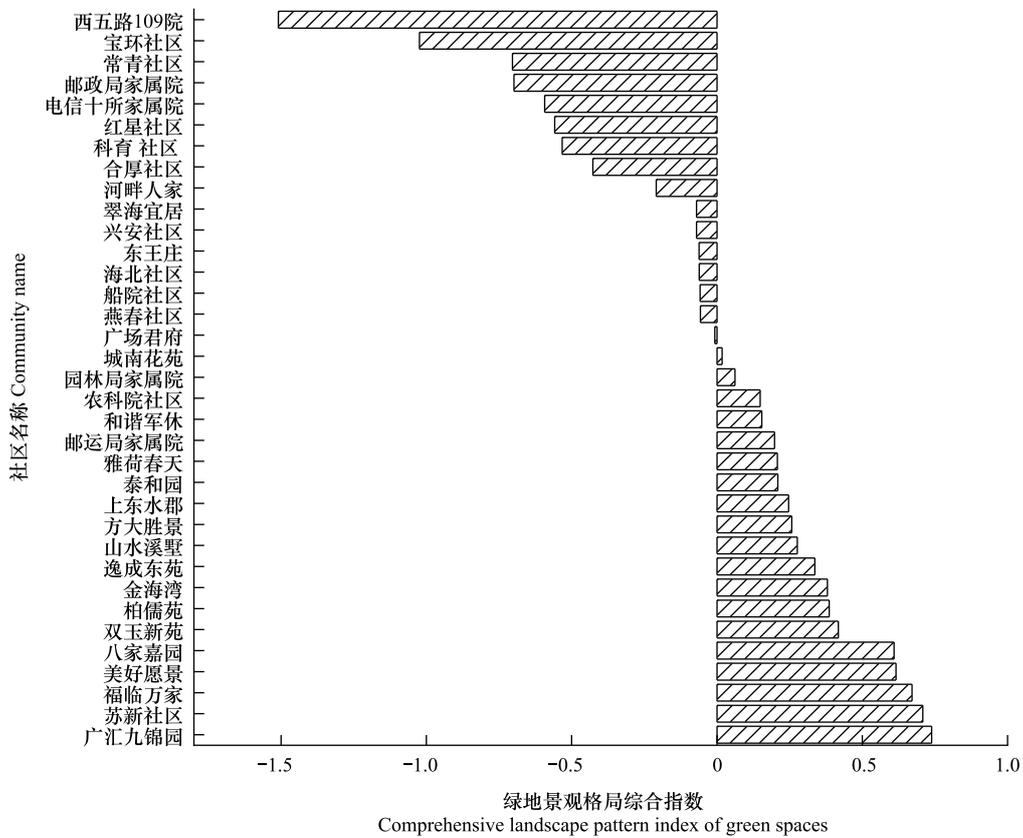


图5 社区绿地景观格局综合指数

Fig.5 Comprehensive index of landscape patterns of community green spaces

区的指数显著高于普通老旧小区 ($P < 0.05$)。这说明,无论在高档社区还是普通社区中,新建社区绿地结构和布局更优,且在普通社区中差异更显著。从社区层次来看,高档新建、高档老旧小区绿地景观格局综合指数高于普通新建社区、普通老旧小区。这表明,在相同建成时间,高档社区绿地结构与配置比普通社区更好。

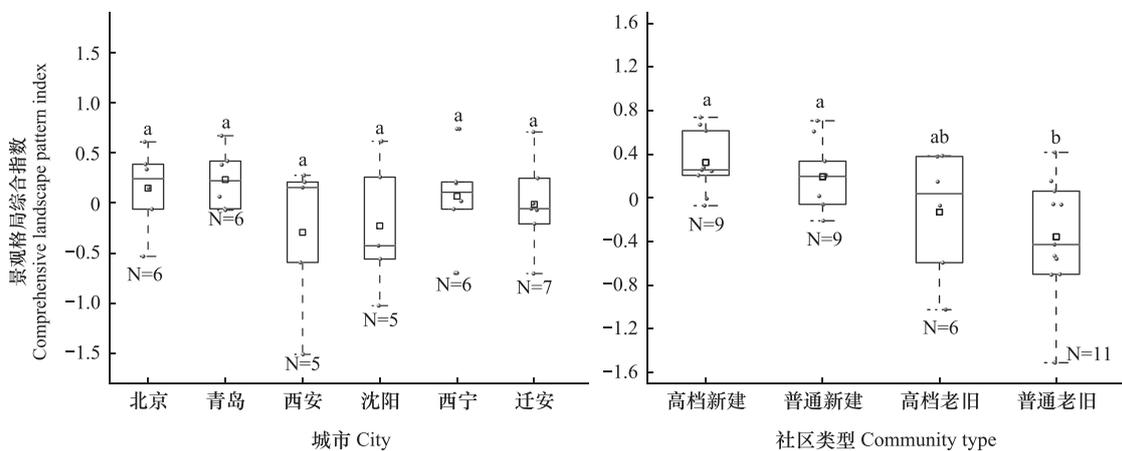


图6 社区绿地景观格局综合指数

Fig.6 Comprehensive index of landscape patterns of community green spaces

3.4 社区绿地景观格局特征影响因素分析

偏最小二乘回归分析结果表明(图7),建筑密度、建成时间、人均GDP以及社区面积是影响北方城市社

区绿地景观格局的主要因子,其变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)值均超过 1。建筑密度与绿地景观格局综合指数之间存在负相关关系,即建筑密度较低的社区往往拥有更优的绿地景观格局;而社区面积、建成时间以及人均 GDP 则与绿地景观格局综合指数正相关,表明社区建成面积更大、建成时间更短以及城市经济发展水平越高的社区,其绿地景观格局相对更优。房价层次与绿地景观格局综合指数呈现负相关关系,可能原因是部分位于老城区的老旧社区绿地景观格局较差而房价较高,但其影响程度相对较低(VIP < 1)。

在自然因素方面,年平均降水量的 VIP 值大于 0.5,说明年平均降水量对社区绿地景观格局有一定正向作用。降水作为植物生长关键因素,在降水量较高地区保障了植物生长用水需求,植被类型较多,维护成本较低。海拔和年平均气温对社区绿地景观格局影响较小(VIP < 0.5)。

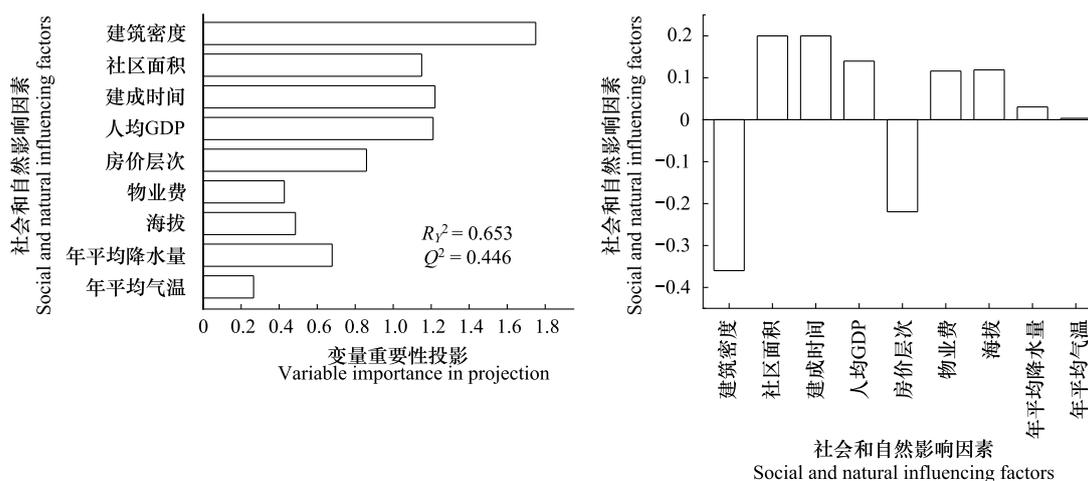


图7 社会和自然因素对社区绿地空间格局影响的偏最小二乘回归分析

Fig.7 Partial least squares regression analysis of social and natural factors on community green space patterns

4 讨论

本研究中景观指数分析结果表明,青岛市社区绿地景观百分比表现较高,西安市社区绿地形状复杂度较低;高档新建社区绿地聚集度、斑块大小、连通性和数量指数均值高于其他三类社区。景观格局综合指数也表明(图 8),青岛市社区绿地数量和连通性公因子得分较高,西安市社区绿地形状复杂度公因子得分较低;高档新建社区绿地聚集度、数量及连通性公因子得分高于其他三类社区。基于以上分析,可以发现景观格局综合指数与景观指数分析结果具有一致性且形式简洁,表明景观格局综合指数科学有效,能在减少信息冗余的同时,客观、准确地反映社区绿地景观格局特征。

本研究发现北方城市社区绿地景观格局受到建筑密度、建成时间、人均 GDP、社区面积等社会经济因素影响较大,而海拔、年平均气温等自然因素影响较小,与前人研究结果具有一致性^[32-34]。以青岛和西安为例,一方面,青岛作为沿海经济强市,房地产市场需求旺盛,开发商在高品质社区建设中更注重绿化配套以提升项目溢价能力^[35],通过限制建筑密度和容积率,为绿化留出更多空间。另一方面,青岛气候湿润,适合多种植物生长,天然地理优势降低了绿化维护成本,所以青岛社区绿地表现良好。而西安作为西北地区重要城市和历史名城,城市规划可能受到历史遗址保护影响。在人口密度较高,土地资源紧张条件下,为满足住房需求,开发商可能倾向于减少绿地面积以提升建筑密度。如部分老旧社区在建设初期未充分考虑绿地需求,导致绿地比例低和形状简单等问题。政府对社区等半自然绿地投入保护资金较少^[36],老旧小区绿地改造等政策执行动力不足。自然条件方面,西安降水量较少,对绿地生长和维护提出了更高的要求。在以上多方面因素共同作用下,西安社区绿地形状复杂度较低且景观格局综合指数得分相对较低于其他城市。经济发展、城镇化进程、

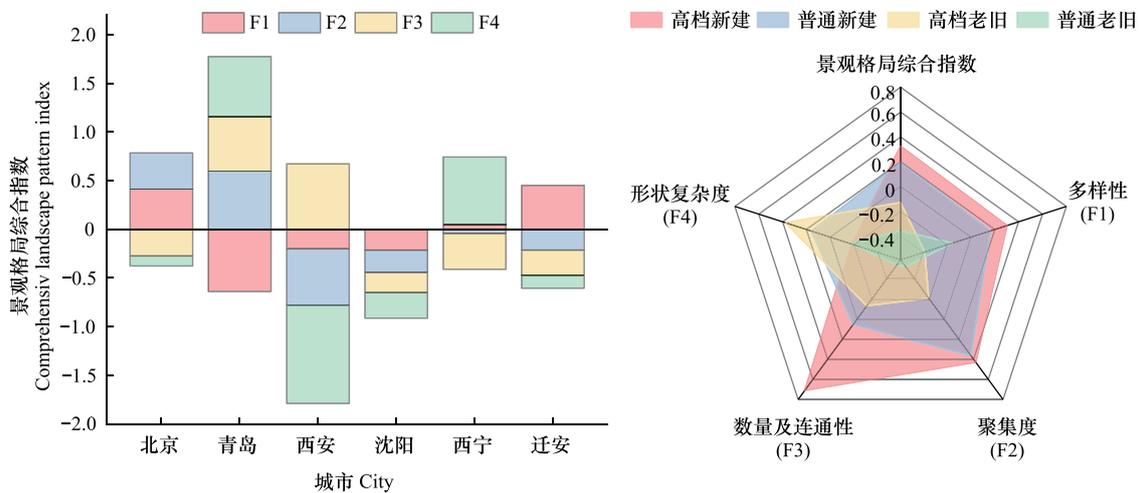


图 8 不同城市、类型社区绿地景观格局综合指数公因子得分

Fig.8 Comprehensive index factor scores of green space landscape pattern in different cities and types of communities

F1—F4 含义同前文,分别指多样性、聚集度、数量及连通性、形状复杂度公因子,其对景观格局综合指数权重分别为 0.29、0.29、0.21、0.21

政策引导以及市场供需变化等因素深刻地影响着城市社区绿地结构与配置^[37],使得社会经济因素成为社区绿地景观格局变化的主要驱动力^[38],而自然因素影响则相对较小^[39]。

本研究探讨了我国北方 6 个典型城市 35 个社区绿地景观格局特征及其影响因素,研究结果可望为优化城市绿地景观格局提供重要参考。如青岛在保持当前高绿地率同时,应通过建设绿地廊道等措施构建多功能耦合的绿地生态网络^[40],而西安则应注重近自然绿地景观营造,提高绿地形状复杂度^[41];老旧社区在生态用地受限情形下,可通过布置垂直绿化和建设绿色屋顶等措施提高绿化率,提升居民生态福祉^[42]。在城市绿地景观格局相关研究中,大部分研究集中在城市尺度或单一城市的绿地景观^[43],本文聚焦于社区尺度,既包含多个代表性北方城市,又涵盖不同类型社区,具有较强的区域代表性,填补了社区尺度绿地景观格局研究的不足。与以往多个景观指数联合分析相比^[44],本文结合因子分析和景观指数方法首次构建社区绿地景观格局综合指数 (CLPI),能够更全面、简洁地量化社区绿地景观格局特征,这一方法为景观生态学研究提供了新的定量指标。然而,受限于中小尺度下遥感数据精度低^[26],相关研究仍需结合实地调查提高解译精度,而实地调查会大幅增加成本。未来遥感数据分辨率进一步提升有望解决这一问题。此外,未来还可结合实地测量数据(如地表温度、植物种类、胸径等),深入探讨社区绿地景观格局与自然、社会经济和文化过程关系,剖析社区绿地景观格局与生态过程耦合机制^[45]。

5 结论

本研究基于高分辨率遥感影像资料,并结合实地调研获取的绿地分布特征和物种构成等数据,通过目视解译提取北方 6 城市 35 个社区土地覆被信息,计算不同类型景观指数,利用因子分析法构建社区绿地景观格局综合指数用以表征北方城市社区绿地景观格局特征。采用偏最小二乘回归方法解析北方城市社区绿地景观格局关键影响因素。主要结论如下:

(1) 北方不同城市社区绿地景观多样性、聚集度、斑块大小、连通性、数量和形状复杂度等均无显著性差异 ($P > 0.05$)。高档新建社区绿地聚集度、斑块大小、连通性和数量显著高于普通老旧社区 ($P < 0.05$)。多样性、聚集度、数量及连通性、形状复杂度等 4 个公因子可以较好概括 15 个景观指数,其累积贡献率达 87.53%。

(2) 绿地景观格局综合指数可以较好反映社区绿地景观格局的整体状况。在城市尺度上,社区绿地景观格局综合指数从大到小依次为:青岛 (0.23)、北京 (0.15)、西宁 (0.07)、迁安 (0.01)、沈阳 (-0.22) 和西安 (-0.29)。从社区类型来看,绿地景观格局综合指数从大到小依次为:高档新建 (0.33)、普通新建 (0.19)、高

档老旧(-0.13)和普通老旧社区(-0.36)。

(3)社会经济和自然条件对社区绿地景观格局综合指数的影响程度由高到低依次为:建筑密度、建成时间、人均GDP、社区面积、房价层次、年平均降水量、海拔、物业费和年平均气温。相较自然因素,社会经济因素对北方城市社区绿地景观格局影响较大,表明北方城市社区绿地主要受人类活动影响。

参考文献(References):

- [1] 董仁才, 孙晓萌, 韩林桅, 翁辰, 王辰星, 张永霖, 马赫, 柳文华, 李思远, 于天舒, 王丹寅, 郑博福. 基于景感生态学促进生态产品价值实现的方法. *生态学报*, 2023, 43(18): 7660-7669.
- [2] Wolch J R, Byrne J, Newell J P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 234-244.
- [3] Hartig T, Mitchell R, De Vries S, Frumkin H. Nature and health. *Annual review of public health*, 2014, 35(1): 207-228.
- [4] Schäffer B, Brink M, Schlatter F, Vienneau D, Wunderli J M. Residential green is associated with reduced annoyance to road traffic and railway noise but increased annoyance to aircraft noise exposure. *Environment International*, 2020, 143: 105885.
- [5] Sun T, Chen L D, Sun R H. Cooling effects in urban communities: parsing green spaces and building shadows. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 94: 128264.
- [6] Li L Y, Uyttenhove P, Van Eetvelde V. Planning green infrastructure to mitigate urban surface water flooding risk-A methodology to identify priority areas applied in the city of Ghent. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 194: 103703.
- [7] 王沫, 刘畅, 李晓璐, 高俊宏, 李霞, 董丽. 近自然社区公园的生物多样性特征——以北京市中心城区为例. *生态学报*, 2022, 42(20): 8254-8264.
- [8] Liu O Y, Russo A. Assessing the contribution of urban green spaces in green infrastructure strategy planning for urban ecosystem conditions and services. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68: 102772.
- [9] 施生旭, 官焯苗. 未来社区理念下老旧小区改造提升及评价指标体系构建. *城市发展研究*, 2024, 31(6): 134-140.
- [10] Wu J G, Jenerette G D, Buyantuyev A, Redman C L. Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: the case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 1-8.
- [11] Kowe P, Mutanga O, Odindi J, Dube T. A quantitative framework for analysing long term spatial clustering and vegetation fragmentation in an urban landscape using multi-temporal landsat data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 88: 102057.
- [12] Huang B X, Chiou S C, Li W Y. Landscape pattern and ecological network structure in urban green space planning: a case study of Fuzhou city. *Land*, 2021, 10(8): 769.
- [13] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [14] Tian Y H, Jim C Y, Wang H Q. Assessing the landscape and ecological quality of urban green spaces in a compact city. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 97-108.
- [15] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. *生态学报*, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [16] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究. *林业科学研究*, 2009, 22(4): 470-474.
- [17] 田晶, 邵世维, 黄怡敏, 余梦婷. 土地利用景观格局核心指数提取: 以中国广州市为例. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2019, 44(3): 443-450.
- [18] 成超男, 胡杨, 赵鸣. 城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1770-1782.
- [19] Wu Z, Chen R S, Meadows M E, Sengupta D, Xu D. Changing urban green spaces in Shanghai: trends, drivers and policy implications. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104080.
- [20] 赵海霞, 王淑芬, 孟菲, 牛铭杰, 骆新燎. 绿色空间格局变化及其驱动机理——以南京都市区为例. *生态学报*, 2020, 40(21): 7861-7872.
- [21] 许浩, 李蔚, 刘伟, 王成康. 南京市域绿地格局时空演变特征及其影响因素. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(2): 407-416.
- [22] Yin J D, Fu P, Cheshmehzangi A, Li Z C, Dong J W. Investigating the changes in urban green-space patterns with urban land-use changes: a case study in Hangzhou, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5410.
- [23] Yan J L, Zhou W Q, Zheng Z, Wang J, Tian Y Y. Characterizing variations of greenspace landscapes in relation to neighborhood characteristics in urban residential area of Beijing, China. *Landscape Ecology*, 2020, 35(1): 203-222.
- [24] 王圣云, 段练成. 中国生态福利绩效时空格局演变及其驱动效应分析. *地理科学进展*, 2023, 42(4): 617-628.
- [25] 李红, 塔娜. 不同类型社区绿地规模和结构对居民心理健康的影响——以上海市郊区为例. *热带地理*, 2022, 42(12): 2031-2041.
- [26] 陈涛, 李志刚, 车生泉. 上海市社区绿地空间格局调查及对比分析——以瑞金社区、莘城社区、方松社区为例. *上海交通大学学报: 农业*

- 科学版, 2014, 32(6): 52-57.
- [27] Wu S Z, Wang D Y, Yan Z R, Wang X J, Han J Q. Spatiotemporal dynamics of urban green space in Changchun: Changes, transformations, landscape patterns, and drivers. *Ecological Indicators*, 2023, 147: 109958.
- [28] 李方正, 解爽, 李雄. 基于 PLSR 模型的北京市中心城绿色空间演变驱动机制研究(1992—2016 年). *北京林业大学学报*, 2019, 41(4): 116-126.
- [29] 郭璇, 朱济友, 徐程扬, 李夏榕, 韦柳端. 类型与结构对北京市居住区宅旁绿色空间质量的影响. *北京林业大学学报*, 2022, 44(5): 55-68.
- [30] Jia Y Q, Tang L N, Xu M, Yang X Y. Landscape pattern indices for evaluating urban spatial morphology-A case study of Chinese cities. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 27-37.
- [31] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与 PLS 过程). *数理统计与管理*, 2002, 21(3): 58-64.
- [32] Zhang P, Dong Y L, Ren Z B, Wang G D, Guo Y J, Wang C C, Ma Z J. Rapid urbanization and meteorological changes are reshaping the urban vegetation pattern in urban core area: a national 315-city study in China. *Science of The Total Environment*, 2023, 904: 167269.
- [33] Zhou X L, Wang Y C. Spatial-temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 268-277.
- [34] Zhao J J, Chen S B, Jiang B, Ren Y, Wang H, Vause J, Yu H D. Temporal trend of green space coverage in China and its relationship with urbanization over the last two decades. *Science of The Total Environment*, 2013, 442: 455-465.
- [35] 郭晶鹏, 冯振威, 陈鸿, 陈志端, 刘淑霞, 吴若昊, 何金锋, 李航程. 北京市高端住宅市场价格时空变化及驱动机制——以孙河乡为例. *地域研究与开发*, 2020, 39(5): 64-69.
- [36] 姚龙杰, 岳邦瑞, 赵若男, 朱宗斌, 潘卫涛, 董清榕. 综合空间分异与成本协调:生态安全格局供需错位问题的精细求解路径[J/OL]. *生态学报*, 2025, (09): 1-16[2025-03-04]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202410092429>.
- [37] 程嘉琦, 胡宏, 束天媛. 基于活动空间的城市不同类型社区居民蓝绿空间品质差异研究. *人文地理*, 2023, 38(1): 44-55.
- [38] Grafius D R, Corstanje R, Harris J A. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape Ecology*, 2018, 33(4): 557-573.
- [39] Zhang X D, Han H Y. Characteristics and factors influencing the expansion of urban construction land in China. *Scientific Reports*, 2024, 14: 16040.
- [40] 周媛, 黎贝, 李朋瑶, 姚婧, 陈明坤, 唐密, 张莉, 陈娟. 基于“生态-气候适应性-游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化. *生态学报*, 2024, 44(13): 5854-5866.
- [41] Sen S, Guchhait S K. Urban green space in India: perception of cultural ecosystem services and psychology of situatedness and connectedness. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107338.
- [42] 黄静, 尹海伟, 孔繁花, 刘宏庆, 孙涛. 屋顶绿化生态系统调节服务与政策效应研究综述. *生态学报*, 2023, 43(22): 9107-9120.
- [43] Yao L, Li T, Xu M X, Xu Y. How the landscape features of urban green space impact seasonal land surface temperatures at a city-block-scale: an urban heat island study in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 52: 126704.
- [44] Li Y L, Ren C, Ho J Y, Shi Y. 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*, 2023, 239: 104842.
- [45] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 陈利顶. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新. *生态学报*, 2021, 41(1): 415-421.