

济南城市森林景观生态格局

鲁敏^{1,2*} 罗晓楠² 王永华² 高鑫² 刘国恒³

(¹山东建筑大学学报编辑部, 济南 250101; ²山东建筑大学艺术学院, 济南 250101; ³华夏幸福基业股份有限公司, 济南 250101)

摘要 城市森林景观生态格局研究不仅是城市森林系统规划与城市生态建设的基础和前提,而且是优化城市空间结构、充分发挥城市森林生态功能以及创建生态宜居环境的重要途径和手段。本研究以RS和GIS技术为支撑,通过总体景观生态格局定量分析和梯度分析等研究方法,采用10个景观指数从斑块水平和景观水平两方面,对济南市建成区城市森林景观生态格局进行定量分析,并提出优化对策。结果表明:济南市建成区城市森林覆盖率为15.8%;城市森林总体景观生态格局在景观水平上表现为城市森林景观斑块类型较齐全、景观破碎化程度较大、各类型城市森林所占面积存在差异、以大斑块为主且同种斑块高度连接,在斑块类型水平上表现为生态公益林以大斑块为主且占优势地位、风景游憩林形状较规则且以大中型斑块为主、道路林及附属林形状复杂且以小斑块为主、生产经营林缺乏;在斑块类型水平上,以风景游憩林为主导类型、生态公益林斑块面积最大、道路林及附属林破碎度大,在景观水平上,城市中心森林景观破碎度大、人为干扰严重、景观形状复杂;在城市森林景观生态格局分析基础上,提出“一环二网、三片四轴、多点棋布”的济南市城市森林生态网络构建方案,从而加强各类型城市森林的连接度,发挥大尺度生态系统的整体生态效益。

关键词 城市森林; 景观生态格局; 梯度分析; 优化对策

Ecological pattern of urban forest landscape of Ji'nan City, China. LU Min^{1,2*}, LUO Xiaonan², WANG Yong-hua², GAO Xin², LIU Guo-heng³ (¹Editorial Department, Journal of Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; ²School of Art, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; ³Huaxia Happiness Foundation Co., Ltd., Ji'nan 250101, China).

Abstract: The ecological pattern research on urban forest landscape is the foundation and premise of urban forest system planning and urban ecological construction, as well as an important way of optimizing urban spatial structure, giving full play to urban forest ecological function and creating ecological and livable environment. Ecological pattern of urban forest landscape in built-up area of Ji'nan city was quantitatively analyzed and the corresponding optimization countermeasures were put forward through quantitative analysis and gradient analysis of the overall landscape ecological pattern by RS and GIS technology with 10 landscape indices at patch level and landscape level. The results showed that urban forest coverage rate in built-up areas was 15.8%. At the landscape level, the overall landscape ecological pattern of urban forest showed following patterns: relatively complete types of urban forest landscape patches, greater degree of landscape fragmentation, different area of various types of urban forest, large major patches, and highly connected same patch types. At the level of patch type, the ecological public welfare forest was dominated by large patches. The shape of scenic recreational forest was regular and dominated by large and medium patches. The shape of road forest and subsidiary forest was complex and dominated by small patches. The production and management forest was lacking. At the level of patch type, landscape recreational forest was the dominant type, ecological public welfare forest patch area was the largest, road forest and ancillary forest fragmentation was large. At the level of landscape, urban central forest landscape fragmenta-

本文由住房和城乡建设部科技计划项目(06-K9-12)和山东省科技发展计划项目(2011RKGB5012)资助 This work was supported by the Ministry of Housing and Urban-Rural Development Science and Technology Project (06-K9-12) and the Shandong Science and Technology Development Plan (2011RKGB5012).

2019-07-02 Received, 2019-10-30 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: lumin@sdjzu.edu.cn

tion was large, human interference was serious, and landscape shape was complex. Based on the analysis of the ecological pattern of urban forest landscape, we proposed the construction scheme of Ji'nan urban forest ecological network, which was "one ring, two networks, three four axes, and multi-point chessboard". Such scheme would help strengthen the connectivity of various types of urban forests and exert overall ecological benefits of large-scale ecosystems.

Key words: urban forest; landscape ecological pattern; gradient analysis; optimization strategy.

城市森林是城市生态系统的重要组成部分和生态城市建设的核心内容,也是重要的碳汇基地,对于维持城市生态系统平衡、营造优美人居环境具有重要意义^[1-3].且与城市森林生态系统的抗干扰能力、生态安全及稳定性、生物多样性等有着密切的联系^[4-6].绿色发展是中国经济社会长期发展的基本方向^[7-8].城市森林的空间特征对于景观格局的演变过程有着深远的影响^[9-10].采用景观生态格局方法对城市森林进行定量化的研究,可使绿色发展理念深入人心,为生态城市和森林城市建设提供理论基础和实践方法^[3,11-13].

当前,基于景观格局的生态学研究对区域生态安全的维护和保障极为重要,已成为国内外学者关注的热点问题之一.随着国内外对城市森林景观生态格局的研究不断加深,景观生态格局理论在景观和土地的评价、规划等方面日益被重视^[12-15].通过RS与GIS技术手段对城市森林景观生态格局进行定量分析已成为景观生态学研究的重点内容^[16].城市森林景观生态格局的量化研究不仅是科学进行城市森林系统规划和城市生态建设的基础和前提,而且是优化城市空间结构、充分发挥城市森林生态功能以及创建生态宜居环境的重要途径和手段^[17-19].国外关于城市森林及景观格局的研究起步较早,而我国在这方面研究相对较慢,且缺少实际建设案例,城市森林建设还停留在注重绿化指标的阶段,对城市植物结构层次的研究相对较少^[20].

本研究运用景观生态学原理,以RS与GIS技术为支撑,通过总体景观生态格局分析和梯度分析,从斑块水平和景观水平两方面对济南市建成区城市森林景观生态格局进行定量分析与研究,以便了解城市森林景观生态格局的生态学过程,并提出优化对策.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究范围为济南市二环路以内的中心城区,面积为14920 hm².济南市属温带季风气候区,夏热冬冷,四季分明,季风气候显著.全年平均降水量为

680.5 mm,夏季(6—8月降水量为375.2 mm)占全年降水的60%以上,日最大降水量为298.4 mm.境内河流主要有黄河、小清河、大汶河三大水系,河流和泉群较多、水量丰沛,故而被称为“泉城”.近年来,济南市城市园林绿化建设成果显著,在公园绿地、风景区建设、道路绿化、附属绿地建设和防护绿地建设方面都取得显著成效,其建成区绿化覆盖率、绿地率、人均公共绿地面积分别达到37%、33.6%和10.3 m².

1.2 城市森林分类

结合以往研究和济南市城市森林建设现状,将在城市范围内对城市环境保护和改善起到直接作用的空间范围内,达到一定面积(>0.2 hm²)和郁闭度(>0.2),以乔木为主体,包含周围所有植物的植物群落定义为城市森林.城市森林与城市密切相关,是服务城市的森林类型,在结构及功能上均不同于传统意义上的森林,主要表现在具有功能化特征突出、对城市环境问题的抗压能力强、结构单一、生物多样性减少、维护费用较高、梯度变化明显等特点.参照何兴元等^[21]对城市森林的分类方式,将济南市建成区城市森林分为道路林、生态公益林、附属林、生产经营林、风景游憩林5种类型(图1).

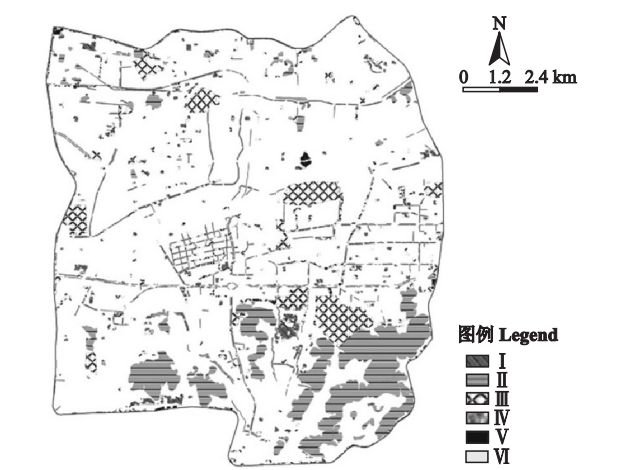


图1 研究区城市森林分类示意图
Fig.1 Sketch map of the urban forest classification in the study area.

I: 附属林 Affiliated forest; II: 生态公益林 Ecological welfare forest; III: 风景游憩林 Scenic recreation forest; IV: 道路 Road; V: 生产经营林 Production and inagement forest; VI: 所有其他值 All other values; VII: 道路林 Road forest. 下同 The same below.

表 1 景观指数简介
Table 1 Landscape index profile

景观指数 Landscape index	缩写 Abbreviation	公式 Formula	单位 Unit	生态学意义 Ecological meaning
斑块类型面积 Patch type area	CA	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right)$	hm ²	某斑块类型的总面积,反映出其间物种、能量和养分等信息流的差异.式中: a_{ij} 为斑块 ij 的面积
斑块密度 Patch density	PD	$PN = \frac{N}{A} \times 10000 \times 100$	ind · 100 hm ⁻²	反映不同类型斑块或整个景观的破碎化及空间异质性程度.式中: N 为景观要素的总面积; A 为所有景观的总面积
斑块类型占景观面积百分比 Patch type as a percentage of landscape area	PLAND	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	%	确定景观中的优势斑块类型.式中: a_{ij} 为斑块 ij 的面积; A 为所有景观的总面积
斑块平均面积 Average area of patch	MPS	$MPS = A/N$	hm ²	显示斑块或景观的破碎程度.式中: N 为斑块数量; A 为所有景观的总面积
最大斑块指数 Maximum patch index	LPI	$LPI = \frac{Max(a_1, \cdots, a_n)}{A} \times 100$	%	其值的大小决定着景观中的优势种、内部种的丰度等生态特征;其值的变化可以改变干扰的强度和频率,反映人类活动的方向和强弱.式中: a_n 为斑块 n 的面积; A 为所有景观的总面积
景观形状指数 Landscape shape index	LSI	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}} \quad LSI = \frac{E}{2\sqrt{\pi A}}$	—	反映人类活动干扰的强度.式中: E 为景观中所有斑块边界的总长度; A 为所有景观的总面积
景观丰富度密度指数 Landscape richness density index	PRD	$PRD = \frac{m}{A} 10^6$	100 hm ²	反映景观组分和空间异质性的关键指标,与物种丰度之间存在很好的正相关性.式中: m 为景观中斑块类型个数
Shannon 均匀度指数 Shannon uniformity index	SHEI	$SHEI = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{-\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i}{\ln m}$	—	反映各斑块在面积上分布的不均匀程度及多样性.式中: P_i 为景观斑块类型 i 所占的比率; H_{\max} 为多样性指数最大值; n 为景观中斑块类型的总数
Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	SHDI	$SHDI = -\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$	—	反映景观异质性(复杂性和变异性),对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感,与物种多样性有着紧密关联.式中: P_i 为景观斑块类型 i 所占的比率; n 为景观中斑块类型的总数
聚集度指数 Aggregation index	AI	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] \times 100$	%	反映景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度,即景观组分的空间配置特征.式中: g_{ii} 为相应景观类型的相似邻接斑块数量

1.3 数据来源及处理

使用 Erdas 软件对 2016 年济南市建成区 SPOT 高分辨率遥感影像进行处理,提取城市森林相关信息.基于栅格运算的区域生态安全评价的最大优势是评价价值可落实到空间任一点(栅格)上,易于找出研究区域中任一点上的生态安全程度,将栅格数据导入 Fragstats 中进行计算^[22].在 ArcGIS 中将矢量图转化为 5 m×5 m 的栅格图,计算各景观指数,最终完成济南市城市森林信息的量化.

1.4 梯度样带的设立

依据济南市城市发展轴线设立东西向(12 km)梯度样带,根据济南市城市特色风貌轴设立南北向(13 km)梯度样带^[23].采用移动窗口法选取 4 m×4 m 窗口、1 km 为移动步长分别沿东西、南北向两条样带滑动.

1.5 景观指数的选取及生态学意义

景观指数变化反映景观生态格局结构组成成分

及空间配置状况.从 Fragstats 软件中选取斑块类型面积(CA)、斑块密度(PD)、斑块平均面积(MPS)、斑块类型占景观面积百分比(PLAND)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、景观丰富度密度(PRD)、Shannon 均匀度指数(SHEI)、Shannon 多样性指数(SHDI)、聚集度指数(AI) 10 个景观指数对济南市城市森林景观生态格局进行分析(表 1).

2 结果与分析

2.1 济南市城市森林总体景观生态格局

2.1.1 斑块类型水平上的城市森林景观生态格局
由表 2 可以看出,生态公益林的 CA、PLAND 和 LPI 值均最大,分别为 1320.51 hm²、56.0%、17.9%,说明生态公益林在研究区城市森林景观中占有优势地位,以大斑块为主;风景游憩林 CA 值为 581.25 hm²,MPS 值最大,为 7.27 hm²,PLAND 值为 24.7%,LSI 值为 8.62,说明风景游憩林以大中型斑块为主,

表 2 济南市城市森林斑块类型上的景观指数
Table 2 Landscape index of urban forest plaque types in Ji'nan City

景观类型 Landscape type	斑块类型面积 Patch type area (hm ²)	斑块类型占 景观面积百分比 Patch type as a percentage of landscape area (%)	斑块个数 NP	斑块密度 Patch density (ind · 100 hm ⁻²)	斑块平均面积 Average area of patch (hm ²)	最大斑块 面积指数 Maximum patch area index (%)	景观形状指数 Landscape shape index
I	193.80	8.2	357	13.93	0.5429	0.88	25.99
II	1320.51	56.0	229	12.06	5.7664	17.92	18.71
III	581.25	24.7	80	3.19	7.2700	7.14	8.62
IV	254.83	10.8	960	39.79	0.2655	0.10	52.93
V	6.25	0.3	1	0.04	6.2500	0.26	1.87

I：附属林 Affiliated forest；II：生态公益林 Ecological welfare forest；III：风景游憩林 Scenic recreation forest；IV：道路林 Road forest.

且形状较为规则；道路林的 NP、PD 和 LSI 值均最大，分别为 960 个、39.79 个 · 100 hm⁻²、52.93、MPS、LPI 值最小，分别为 0.27 hm²、0.1%，说明道路林以小斑块为主，破碎化程度较大，形状复杂，受人为干扰程度大；附属林的 PLAND、PD、MPS、LPI 值分别为 8.2%、13.93 个 · 100 hm⁻²、0.54 hm²、0.9%，说明附属林破碎化程度较大，以小斑块为主；生产经营林在研究区仅有一处，不对其进行梯度分析。

2.1.2 景观水平上的城市森林景观生态格局 济南市建成区城市森林总面积为 2356.64 hm²，覆盖率达到 15.8%；NP 值较少，为 1627 个；MPS、PD 和 LPI 值较低，分别为 1.45 hm²、69.01 个 · 100 hm⁻²、17.9%，说明景观破碎度较大；LSI 较高，达 45.32，说明斑块形状复杂多样，受人为活动影响较大；SHDI、SHEI 和 PRD 值较低，分别为 1.13、0.70、0.21 个 · 100 hm⁻²，说明城市森林斑块类型齐全，破碎化程度较大，各类型城市森林所占面积存在差异；AI 达到 93.2%，数值较高，表明济南市城市森林景观中以大的斑块为主，且同种斑块高度连接。

2.2 斑块类型水平上的城市森林景观生态格局梯度分析

2.2.1 斑块类型面积 (CA) 从东西样带梯度变化曲线可以看出，生态公益林和风景游憩林 CA 值的波动较大，表现出明显的特征；道路林和附属林 CA 值变化不大，随梯度变化不明显；生态公益林 CA 值自西向东呈阶梯状递增的趋势(图 2a)，与样带上自西向东有大面积山体分布且逐渐增多相关。风景游憩林 CA 值在中心以西 1 km 处向东直线上升，在中心以东 3 km 处达最高值，是因该区分布千佛山风景名胜等较多面积较大的城市公园及风景名胜区。道路林 CA 值的梯度变化不明显，在中心样方达到高峰。该样方内老城区原有的道路绿化水平较高，且道路密度较大。附属林 CA 值在中心以东 3 km 的样

方内较高，与样方内分布的学校、医院等单位较多、且城市森林建设状况良好有关。

从南北样带梯度变化曲线可以看出，生态公益林和风景游憩林 CA 值的波动较大(图 2b)。生态公益林 CA 曲线表现为两头高、中间低，南部样带的 CA 值高于北部，原因在于样方内主要分布多处山体，城市森林面积大，北部样方以小清河、东泺河等滨河绿地为主，面积较小；风景游憩林 CA 值大都较高，中心处达最高值，因该区内分布大明湖公园等大型风景游憩林斑块。道路林和附属林 CA 值变化不大；道路林 CA 值在中心处达最高值，这与样方处于路网密度大、绿化状况良好的城市中心有关；附属林中心以南的 CA 值高于中心以北，中心以南样方主

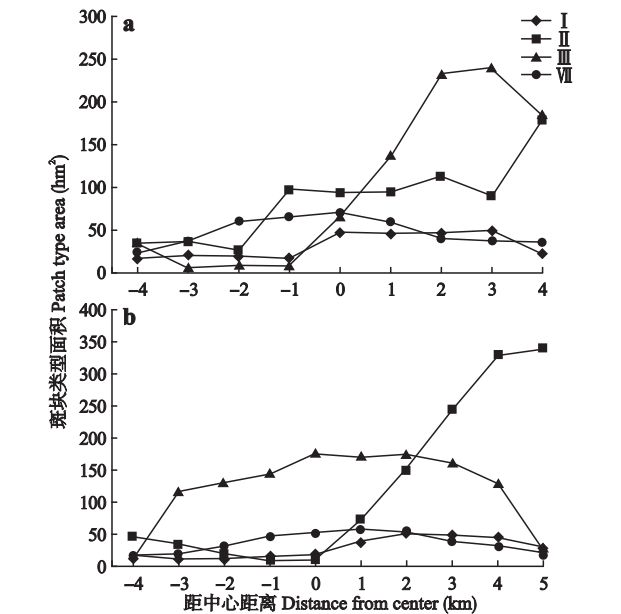


图 2 斑块类型面积随梯度的变化
Fig.2 Change of patch type area with gradient curve.
a) 东西样带 West-east strip; b) 南北样带 North-south strip. VII: 道路林 Road forest. 样带的中心样方设为 0 km 点，西、北向为负值，东、南向为正值 The center square of the sample strip was set to 0 km, the west and north directions were negative values, and the east and south directions were positive values. 下同 The same below.

要分布学校、医院等单位绿地。

2.2.2 斑块类型面积占景观面积的百分比(PLAND)

由图 3a 可以看出,在东西样带上,生态公益林 PLAND 值在中心以西 1 km 处出现最高值,样方内有金鸡岭、七里山等斑块面积较大的山体;风景游憩林 PLAND 值在中心以西 1 km 至中心以东 3 km 样方内呈直线上升趋势,在以东 3 km 处最高,原因在于样方内分布有千佛山公园等大型风景游憩林斑块;道路林 PLAND 值在中心以西 2 km 样方内达最高值,源于该样方内为老城区的中心、道路密度大、道路林保存较好;附属林 PLAND 值变化不明显,中心以西 3 km 处达最高值,说明东西样带以西的城市森林建设状况较差。

由图 3b 可以看出,在南北样带上,风景游憩林与生态公益林在南北样带上的 PLAND 高、低峰值交相呈现,可以看出两者在南北样带中的重要地位。风景游憩林高峰值主要在中心至中心以西 3 km 样方内,因此区集中分布大明湖、趵突泉等大型城市中心公园绿地;生态公益林主要集中在中心以北 4 km,主要分布小清河等以滨河绿带为主的样方及南部山区样方内。道路林 PLAND 最高值在中心以北 1 km 样方内出现,与样方内城市景观中心道路绿化良好有关;附属林曲线变化不大且较低,说明附属林斑块缺乏。

2.2.3 斑块密度(PD) 由图 4 可以看出,两条样带上,道路林的PD值最大,远高于其他3种城市森林。

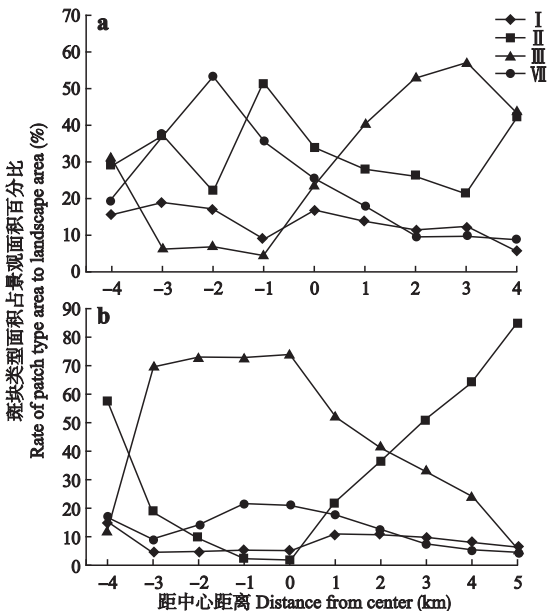


图 3 斑块类型面积占景观面积百分比随梯度的变化
Fig.3 Change of percentage of patch type area to landscape area with gradient.

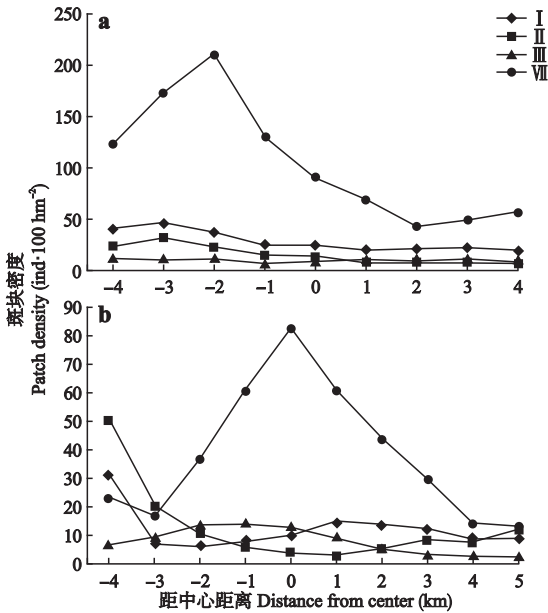


图 4 斑块密度随梯度的变化
Fig.4 Change of patch density with gradient.

道路林 PD 值在城市中心区较高,距离中心越远越低,在东西样带上距中心以西 2 km 达到最高值,该区为济南市老城区的中心,路网密集,道路林建设较好。

生态公益林在东西样带上的 PD 值变化不明显,但在距中心以西 3 km 的样方内出现小高峰,因该区域兴济河不连续的滨河绿带所致;南北样带上中心以南的 PD 值均较低,说明样方内景观破碎度低、生态公益林现状良好;在距中心以北 4 km 样方内出现小高峰,样方内生态公益林以小清河等滨河绿带的形式存在,但绿化现状较差。风景游憩林 PD 值在东西样带上较低,说明东西样带上破碎度较低;在南北样带中心周边样方内出现一小高峰,呈现一定程度的破碎化。

2.2.4 景观形状指数(LSI) 由图 5 可以看出,道路林的 LSI 值在两条样带上均较大,尤其在东西样带上维持了较高数值,且随样方的滑动而产生波动,是由于东西样带处在城市发展轴上,受城市化影响大,斑块形状复杂;在中心以西 2 km 处达到最大值,是由于此样方位于纬二路至纬十二路之间,人为干扰强烈,路网密度大。生态公益林的 LSI 值在两条样带上都变化较大,主要是由于生态公益林所依附载体的形状及城市森林建设状况所决定的。风景游憩林的 LSI 值变化较小,是由于风景游憩林由人工划定,城市发展影响较小。附属林的 LSI 值在两条样带上的变化曲线基本相同,这与附属林的分布形式(单位绿地)有关,单位绿地的建筑布局及人为规划等

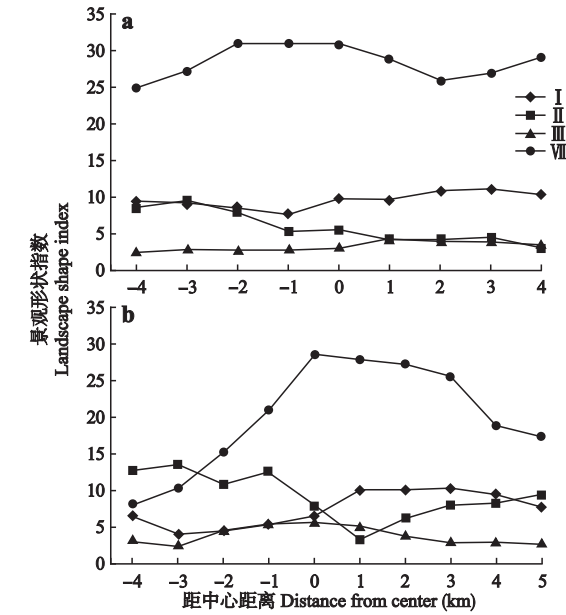


图5 景观形状指数随梯度的变化
Fig.5 Change of landscape shape index with gradient.

影响较大,导致林地形状复杂多样且不规则^[24].

2.3 景观水平上的城市森林景观生态格局梯度分析

2.3.1 斑块密度(PD) 由图6可以看出,在东西样带上,PD值呈西高东低的变化.在中心以西2 km处出现最大值,样方内城市森林景观破碎化较高,空间结构复杂,因该区主要以面积小且分散的道路林、附属林为主.中心以东的PD值较低,是因为中心以东区域以破碎化程度低、空间结构相对简单、斑块类型大的生态公益林、风景游憩林为主.

南北样带的PD值变化不大.在城市中心处达最高值,说明城市中心的城市森林景观破碎度高,斑块面积小.中心以北的PD值较低,原因在于样方内城市森林建设差、数量较少.样带北端的PD值增大,用该区处于城市边缘,边缘效应导致城市森林密度相对增加.中心以南区域的PD值较小,原因在于该区城市森林类型简单,以大型斑块为主.

2.3.2 景观形状指数(LSI) 研究区城市森林在两条样带上的LSI值表现出与PD值相似的变化趋势.在东西样带,中心以西2 km处的LSI值最高,因为该样方内以附属林及道路林为主,人为干扰强烈,斑块形状复杂;自此向东LSI值逐渐下降,该区内城市森林形状越来越规则,东部以大面积生态公益林为主,形状相对规则.在南北样带,中心处LSI值达最大,样方内人类活动对城市森林形状、分布影响较大;LSI值从中心向南、北两端呈现不同程度的下降趋势,样方内城市森林斑块形状趋于规则.

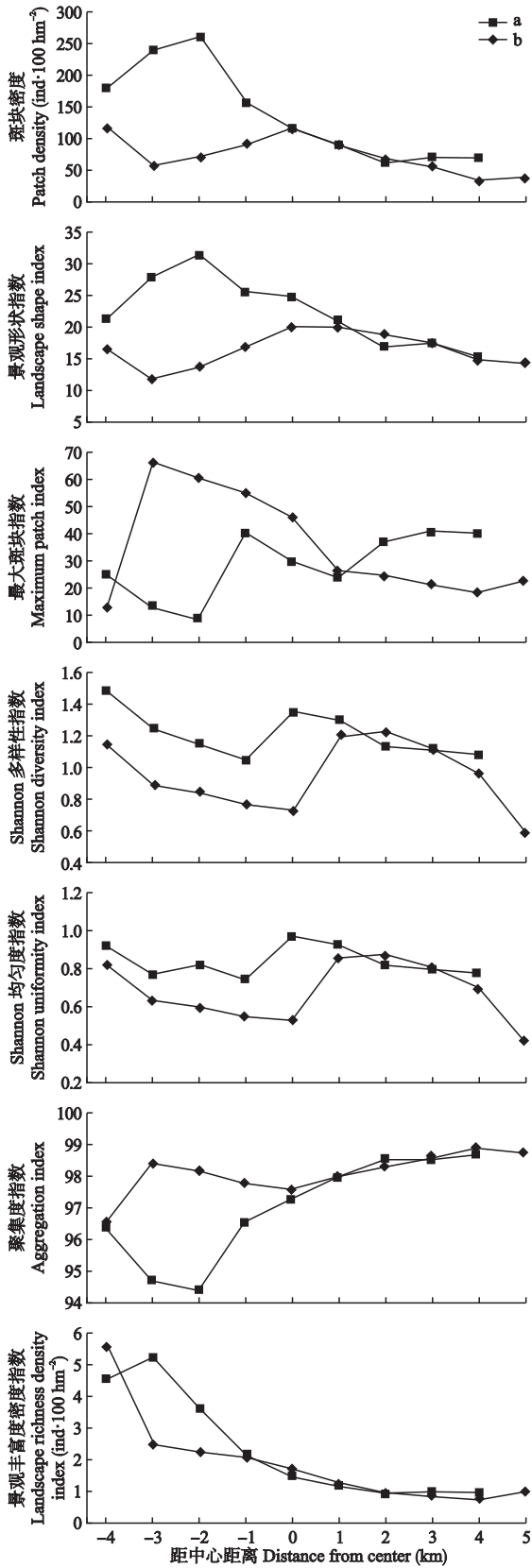


图6 景观水平上的梯度分析
Fig.6 Gradient analysis on landscape level.

2.3.3 最大斑块指数(LPI) 在东西样带上,LPI变化较为剧烈,大致呈现“W”状,由西至东LPI明显波

动,中心以西 2 km 处出现最低值,是由于该区域城市化程度高,以小面积的道路林及附属林为主,缺乏大面积的城市森林;距中心以西 1 km 处及以东 3~4 km 范围内的 LPI 值最大,主要是由于在距中心以西 1 km 处有英雄山风景名胜区等大面积生态公益林,在距中心以东 3~4 km 范围内存在千佛山风景名胜区等大型绿地。

在南北样带上,LPI 呈现“Λ”状,在中心以北 4 km、中心以南 1~5 km 处出现低值,说明这些区域的城市森林类型丰富,优势度低;在中心以北 0~3 km 范围内 LPI 明显上升,因为样方内以占有所有城市森林面积的比重最大的风景游憩林为主。

2.3.4 Shannon 多样性指数 (SHDI) SHDI 在东西样带呈现震荡变化的趋势。中心以西 4 km 处 SHDI 出现高峰值,该区位于二环西路附近且城市森林类型丰富。向东移动,SHDI 值持续减小,斑块分布越来越不均匀,破碎度增高。

SHDI 在南北样带上呈现与东西样带相似的变化趋势。样带北端至中心处移动过程中,SHDI 值不断降低,斑块分布越来越不均匀,各类型城市森林所占面积差异性增大。中心以南 2 km 处 SHDI 值最大,该区内城市森林破碎度较大,斑块分布均匀。样带最南端 SHDI 值最低,该区内城市森林类型单一,以大面积生态公益林为主。

2.3.5 Shannon 均匀度指数 (SHEI) SHEI 在东西样带呈现出一定程度的震荡,但变化趋势不大。中心样方内 SHEI 值最大,该样方内城市森林类型丰富,类型斑块无明显优势,均匀度高;中心以西 1 km 处,道路林为优势城市森林类型;中心以西 3 km、以东 2~4 km 范围内的城市森林优势类型为生态公益林,导致 SHEI 值较低。

南北样带上,SHEI 值震荡幅度较大,变化趋势明显。中心以南 2 km、城市以北 4 km 处 SHEI 值较高,说明样方内无优势城市森林类型,斑块分布均匀;SHEI 值在中心样方内出现波谷,该区内以面积较大的风景游憩林为主;中心以南 5 km 处达最低值,说明该区景观多样性程度低,斑块类型优势度高,因该区以面积较大的生态公益林为主要类型。

2.3.6 聚集度指数 (AI) 东西样带上 AI 变化趋势较大,与 PD 变化走势相反。最东端 AI 值达最大,该区以连接度较高的大面积斑块为主。中心以西 2 km 处的 AI 值最低,该区以小斑块为主,离散度高。

南北样带上 AI 值变化较小,与 PD 变化走势相反。样带最南端的 AI 值最大,说明该区内斑块面积

大且聚集度高。最北端的 AI 值最低,说明该区内破碎度高,以离散的小面积斑块为主。

2.3.7 景观丰富度密度指数 (PRD) PRD 在两条样带上的变化大体相同,中心以西 3 km、中心以北 4 km 处 PRD 值最大,说明两处内城市森林类型丰富、空间异质性高。自西向东、自南向北 PRD 降低,样带上的城市森林类型逐渐单一、空间异质性减小。

2.4 济南市城市森林景观生态格局存在的问题

在斑块类型水平上,研究区受建设用地的影响,景观斑块数量增加,导致部分区域景观格局破碎化程度加剧。其中,风景游憩林分布不合理,其主要分布于城市中东部,城市西北部缺少大面积的林地建设,空间规模及服务半径不能满足居民需求,存在服务盲区;道路林规划建设欠佳,破碎化程度及受人为干扰程度大,复层植物群落建设缺乏,生态功能效益低;附属林分布杂乱,结构不合理,以小斑块为主,破碎化程度较高;生态公益林分布集中,主要分布于城市南部,建设力度小,其他地区建设现状差;生产经营林较少^[25-26]。

在景观水平上,城市森林虽然景观类型较为齐全,但空间分布不均衡,以大中型斑块为主,整体破碎化程度较高;城区东南部丰富度低,聚集度大;其他区域破碎化程度大,空间异质性高。风景游憩林主要分布于城市中部,生态公益林主要分布于城市南部,附属林和道路林相对分散。

2.5 济南市建成区城市森林景观生态格局优化方案

城市森林规划在很大程度上是城市森林空间结构重组的过程,也就是城市森林景观格局及元素优化的过程。通过对城市森林景观格局的研究,可以得到其景观格局的现状、动态变化、空间梯度特征等资料,从中发现城市森林景观格局存在的问题,而解决这些问题的途径即城市森林景观格局优化的方案^[27]。

1) 构建城市森林生态网络体系。将生态公益林、风景游憩林、道路林、附属林、生产经营林有机地联系在一起,将小面积城市斑块及大面积城市斑块通过廊道有机结合,扩大斑块连接度,用以城市涵养水源、保护生物多样性,形成最大限度发挥城市森林生态功能的生态网络体系^[28-29]。

2) 改变目前风景游憩林和生态公益林的不合理布局。在科学合理的位置新建或改建一些城市森林斑块,尽量使风景游憩林和生态公益林的服务半径与空间规模相适应,在植物选择上要遵循适地适

树原则,使斑块和廊道的植物组成上具有相似性.

3) 加强城市西北部大中型城市森林斑块的建设力度.加强各斑块之间的物质交换与能量流动,提高绿地生态系统的连续性,形成网格化的廊道体系^[30].整合现有城市森林斑块,降低景观破碎度,构建更加合理的景观空间结构.依据城市森林生态网络以及景观生态格局优化理论,构建“一环二网、三片四轴、多点棋布”的济南市城市森林生态网络(图7),打造林水一体化的城市森林生态系统,从而加强各类型城市森林连接度,最大尺度地发挥生态系统的整体生态效益.

“一环”指济南市环城绿带,是济南市的外生态环,即指二环路林带.根据具体环境,在二环路两侧建设15~30 m宽的道路林带,并在重点地段建设小型绿地广场、小游园等绿化景点.“二网”指道路林网和水系林网.二网的建设构成了城市森林生态网络的骨架.通过二网的建设可以将城市内各类型的城市森林有机地结合在一起,全面整合林地、林网、散生树木等多种形式,有效增加城市林木数量,恢复城市水体,使城市森林与各级别的河流、沟渠、湖泊等连为一体.“三片”指南部山区生态培育区、中部泉城景观特色区以及西北部生态防护区.“四轴”指泉城特色风貌轴、城市时代发展轴、小清河生态景观轴及铁路沿线生态防护轴.通过四大主要轴线的建设,加强了与周围环境的沟通,将南部生态区及北部黄河防护林带的生态效能引入二环路以内的区域,为城市环境服务.“多点棋布”指遍布整个城市二环路以内区域的各类风景游憩林、生态防护林、道路林及附属林等.结合二网的建设,在围合交叉而划分出的各

城区块中,对生物群体较为敏感的地段和地点建立多个绿点,将生物由天然栖息地引入城市森林当中,在科学合理的距离范围内布置各类型城市森林,缓冲内部环境质量压力,形成完整的城市森林生态网络系统^[27].

4) 加强附属林和道路林建设,提高其在城市森林景观中的比重.

5) 加强水系生态防护林建设,利用其带状廊道连通性串联周围斑块,提高景观连接度,降低景观破碎化程度.

3 结 论

相比以往传统手段对城市森林景观生态格局的研究,本研究在方法环节上以3S与GIS技术为基础,通过总体景观生态格局定量分析和梯度分析等方法,对济南市建成区城市森林景观生态格局进行了优化和完善,进而为生态网络的构建与效用评估提供参考依据.本研究采用10个景观指数,分别从斑块水平和景观水平两方面进行定量分析,得出济南市城市森林景观生态格局存在的问题,并提出相应的优化方案,依据城市森林生态网络以及景观生态格局优化理论,构建出“一环二网、三片四轴、多点棋布”的济南市城市森林生态网络.通过对济南市建成区城市森林总体景观生态格局分析及梯度分析,结果表明,济南建成区城市森林覆盖率为15.8%.斑块类型水平上,生态公益林占据优势地位,主要分布于南部,以大斑块为主;风景游憩林面积比例最大,且处位于城市中心,为主导类型,以大中型斑块为主;道路林及附属林以小斑块为主,破碎化程度较大,形状较复杂,受人为干扰程度大;生产经营林较为缺乏.景观水平上,城市森林景观斑块类型较齐全,但空间分布不均衡,以大中型斑块为主,整体破碎化程度较高;城市中心景观受人为干扰程度大,景观形状复杂;城市东南部城市森林以大斑块为主,连接度高.该城市森林景观格局能有效改善栖息地的生境质量,增强景观整体连续性,并降低总体生境破碎化程度,但其景观结构和空间格局对景观连接度的影响并不强烈.

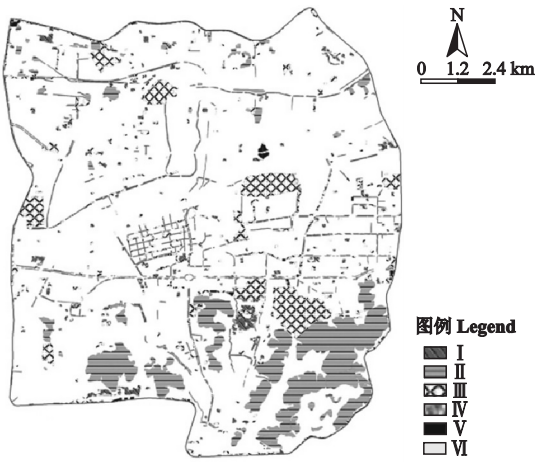
参考文献

[1] Teng M-J (腾明君), Zhou Z-X (周志翔), Yue H (岳 辉), et al. Ecological approach to low carbon gardens. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2012, 28(4): 40-43 (in Chinese)

[2] Lu M (鲁 敏), Qin B-L (秦碧莲), Liu J (刘

图7 济南市城市森林生态网络体系规划图

Fig.7 Urban forest ecological network system planning map in Ji' nan.



- 佳), *et al.* Analysis on the landscape composition and spatial pattern of green space in the built-up area of Ji'nan City. *Journal of Shandong Jianzhu University* (山东建筑大学), 2015, **30**(1): 13-18 (in Chinese)
- [3] Gao J (高 峻), Yang M-J (杨名静), Tao K-H (陶康华). Analysis and research on the landscape pattern of urban green space in Shanghai. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2000(1): 53-56 (in Chinese)
- [4] Li Z-H (李志华), Liu X-H (刘锡辉), Zhang Z-C (张智昌), *et al.* Analysis and development countermeasures of forest landscape pattern in Shenzhen City. *Journal of Chinese Urban Forestry* (中国城市林业), 2017, **5**(6): 23-28 (in Chinese)
- [5] Tang L (唐 利), Shao J-A (邵景安), Guo Y (郭跃), *et al.* Dynamic characteristics and driving factors of forest landscape ecological pattern in community level. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(6): 2101-2117 (in Chinese)
- [6] Yu K-J (俞孔坚), Li D-H (李迪华), Duan T-W (段铁武). Landscape safety pattern design and geographic information system application in sensitive areas: A case study of Xiangshan ski resort, Beijing. *Chinese Landscape Architecture* (中国园林), 2001(1): 11-16 (in Chinese)
- [7] Wang Y (王 勇), Li H-Y (李海英), Yu H (余海). Spatial pattern and evolution characteristics of green development in China's provinces. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2018, **28**(10): 96-104 (in Chinese)
- [8] Quattrochi D. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**: 119-122
- [9] Zhang Z, Zinda JA, Yang Z, *et al.* Effects of topographic attributes on landscape pattern metrics based on redundancy ordination gradient analysis. *Landscape & Ecological Engineering*, 2017, **14**: 67-77
- [10] Lv HL, Yang YB, Zhang D, *et al.* Perimeter-area ratio effects of urbanization intensity on forest characteristics, landscape patterns and their associations in Harbin City, Northeast China. *Urban Ecosystems*, 2019, **22**, DOI: 10.1007/s11252-019-00850-0
- [11] Liang Y-Y (梁艳艳), Zhou N-X (周年兴), Xie H-W (谢慧玮), *et al.* Long-term dynamic simulation of the ecological pattern change of the forest landscape in Lushan Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(24): 7807-7818 (in Chinese)
- [12] Yang W-R (阳文锐). Time and space changes and driving forces of urban landscape pattern in Beijing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(13): 4357-4366 (in Chinese)
- [13] Wang M-L (王美玲), Zhang J-C (张继超), Wang B-J (王舶鉴), *et al.* Dynamics of forest landscape pattern in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2017, **36**(11): 3138-3147 (in Chinese)
- [14] Chen L-D (陈利顶), Li X-Z (李秀珍), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* The development history and future research focus of landscape ecology in China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(12): 3129-3141 (in Chinese)
- [15] Zhang Y (张 月), Zhang F (张 飞), Zhou M (周梅), *et al.* Landscape ecological risk assessment and timely spatial differentiation of the Lu Aibi Lake area in arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(1): 233-242 (in Chinese)
- [16] Zhou Y-D (周亚东), Zhou Z-D (周兆德). Study on ecological pattern of forest landscape in Hainan Island based on GIS and Fragstats. *Journal of Central South University of Forestry* (中南林业科技大学学报), 2015, **35**(5): 78-83 (in Chinese)
- [17] Ye X (叶 鑫), Zou C-X (邹长新), Liu G-H (刘国华), *et al.* Main contents and progress of ecological security pattern research. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(10): 3382-3392 (in Chinese)
- [18] Ye W (叶 伟), Wu R-L (吴荣良), Lai R-W (赖日文), *et al.* Analysis of forest urban landscape structure based on 3S technology. *Journal of Central South University of Forestry* (中南林业科技大学学报), 2015, **35**(1): 56-61 (in Chinese)
- [19] Zhang H (张 欢), Jiang F (江 芬), Wang Y-Q (王永卿), *et al.* Spatial and temporal differences and distribution characteristics of ecological livability and industry level in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *China Population, Resources and Environment* (中国人口·资源与环境), 2018, **28**(11): 73-82 (in Chinese)
- [20] Voogt J, Oke T. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **104**: 119-122
- [21] He X-Y (何兴元), Liu C-F (刘常富), Chen W (陈玮), *et al.* Discussion on classification of urban forest. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(5): 175-178 (in Chinese)
- [22] Pan J-H (潘竟虎), Liu X (刘 晓). Assessment of landscape ecological security and optimization of landscape pattern based on spatial principal component analysis and resistance model in arid inland area: A case study of Ganzhou District, Zhangye City, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(10): 3126-3136 (in Chinese)
- [23] Zhu Y-J (朱耀军), Wang C (王 成), Jia B-Q (贾宝全), *et al.* Landscape pattern gradient of canopy covering in the main urban area of Guangzhou. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(20): 5910-5917 (in Chinese)
- [24] Zhang D-W (张大伟), Wang X-L (王新亮), Bao G-D (包广道), *et al.* Analysis of land type change and driving factors in western Jilin Province based on landscape index. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology* (吉林林业科技), 2016, **45**(6): 41-47 (in Chinese)
- [25] Yuan X-H (袁晓红), Li J-P (李际平), Zhao C-Y (赵春燕). Study on the construction of forest landscape patches in the west Dongting Lake area. *Journal of Cen-*

tral South University of Forestry & Technology (中南林业科技大学学报), 2014, **34**(7): 36–40 (in Chinese)

[26] Ye W (叶 伟), Wu R-L (吴荣良), Lai R-W (赖日文), *et al.* Analysis of forest urban landscape structure based on 3S technology. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2015, **35**(1): 56–61 (in Chinese)

[27] Lu M (鲁 敏), Liu G-H (刘国恒), Zhao J (赵洁), *et al.* Application research of landscape pattern analysis in urban forest planning. *Journal of Shandong Jianzhu University* (山东建筑大学学报), 2012, **27**(1): 67–70 (in Chinese)

[28] Song D-H (宋党辉), Gong B (弓 弼). Research on construction method and strategy of ecological landscape optimization system in Yangling demonstration area. *Shaanxi Forest Science and Technology* (陕西林业科技), 2015(2): 81–85 (in Chinese)

[29] Liu J-J (刘俊杰), Chen J-R (陈璟如), Lai Y-N (来燕妮), *et al.* Optimization and application of ecological network method based on landscape pattern and connectivity evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2019, **30**(9): 3108–3118 (in Chinese)

[30] Chen Z (陈 铸), Huang Y-B (黄雅冰), Zhu Z-P (朱志鹏), *et al.* Evolution of landscape pattern in Fuzhou based on topographic gradient features. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(12): 4135–4144 (in Chinese)

作者简介 鲁 敏, 女, 1963 年生, 博士, 教授. 主要从事环境生态、景观生态、园林生态等研究. E-mail: lumin@sdjzu.edu.cn

责任编辑 杨 弘
