

基于景观格局分析的城市生态网络修复研究*

Urban Ecological Network Restoration Based on Landscape Pattern Analysis

吴远翔 朱 逊 刘晓光 李朦朦 陆 明 WU Yuanxiang, ZHU Xun, LIU Xiaoguang, LI Mengmeng, LU Ming

摘 要 由绿地和水体等构成的城市生态网络呈现出高度的空间异质化特征,在强烈的人工干扰作用下,往往网络结构单一、空间破碎严重、生态服务功能退化,造成一系列城市生态问题。在城市层面上对生态网络进行结构修复和功能强化,对改善城市生态环境意义重大。从生态网络的景观格局与城市生态过程关联的视角切入,以ArcGIS作为数据分析平台,以景观格局指数集合作为核心指标,以哈尔滨市南岗区为研究案例,对网络结构特征、生态服务和社会服务进行量化评析,并提出改善网络结构、增强网络联通性、强化服务职能的网络修复策略,为我国城市生态网络修复提供新的技术解决方案。

Abstract Urban ecological network which is composed of green space and water is characterized by high spatial heterogeneity. Within the context of artificial interference, urban ecological network shows characters of construction demonization, spatial fragmentation and ecological function degradation. To solve urban ecological problems, it is important to improve the ecological environment of the city to repair and strengthen the ecological network at the city level. From the perspective of the relationship between landscape patterns in ecological networks and urban ecological processes, ArcGIS is used as a data analysis platform, landscape pattern index set cooperation as the core indicator, and Nangang district of Harbin City as a study case. The characteristics of network structure, ecological services and social services are quantitatively evaluated. We put forward the network repair strategy of improving network structure, enhancing network connectivity and strengthening service function, which provides a new technical solution for urban ecological network restoration in China.

关键词 城市生态修复 | 生态网络 | 景观空间格局 | 格局评价指标 | 哈尔滨南岗区

Keywords Urban ecological restoration | Ecological network | Landscape space pattern | Landscape pattern index | Nangang District in Harbin

文章编号 1673-8985 (2019) 01-0040-05 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20190107

作者简介

吴远翔

哈尔滨工业大学建筑学院
寒地建筑科学实验中心

副教授, 博士

朱 逊

哈尔滨工业大学建筑学院
副教授, 博士

刘晓光

哈尔滨工业大学建筑学院
副教授, 博士

李朦朦

哈尔滨工业大学建筑学院
博士研究生

陆 明

哈尔滨工业大学建筑学院
副教授, 博士

0 引言

由绿地、水体等组成的城市生态网络集成了生命支撑、生态调节、环境保护等多种生态功能^[1],是城市生态系统稳定和区域生态安全的重要保障。我国《城市绿地系统规划编制纲要》规定,规划要“科学制定各类城市绿地的发展指标,合理安排城市各类园林绿地建设和市域大环境绿化的空间布局”。近年来,《城市园林绿化评价标准》(2010)等一系列法规的颁布,为城市绿地的发展指标和数量控制提供了统一的评价规范^[2]。然而,由于对城市生态空间分布与生态过程的影响与作用的研究刚刚起步,量化

分析格局正处于探索应用阶段,在当前的城市生态网络规划评价中,对其空间格局多以“x环x心”“x轴x带”等定性描述为主,缺乏一套系统的、量化的生态分析与评价方法。

景观生态学研究表明,景观的空间格局分布会对生态过程和生态特征产生强烈的影响^[3],特别是当绿地覆盖率小于40%时,绿地整体生态效益的发挥主要取决于绿地的内部结构和空间布局^[4-5]。在建设密度高的城市中心区,由于用地的资源稀缺性,通过大幅度提高绿化覆盖率来改善城市环境往往很难实现。因此,通过空间格局的优化来提升生态网络的

*基金项目:国家自然科学基金重点项目“严寒地区城市微气候调节原理与设计方法研究”(编号51438005),住房和城乡建设部科研开发项目“基于生态系统服务的寒地城市生态网络规划关键技术研究”(编号2017-K4-008),黑龙江省应用技术与开发计划“寒地可持续社区基础设施规划模型”(编号GZ15A511)。

表1 绿地景观单元分级表

单元名称	分级标准	包含类型	服务职能
枢纽斑块	斑块面积 $\geq 2 \text{ hm}^2$	综合性公园、专类公园、林地、居住区公园、大型防护绿地等	提供生态服务的重要主体, 生物栖息地、城市多种生态过程发生的“源”与“汇”, 公共活动集中场地
小斑块	$2 \text{ hm}^2 \geq$ 斑块面积 $\geq 0.5 \text{ hm}^2$	附属绿地、居住区小游园等	改善小生境、调节小气候、生态踏脚石, 日常游憩
主生态廊道	廊道宽度 $\geq 30 \text{ m}$	滨水绿地、带状防护绿地等	生物多样性保护通道、调节气候、过滤污染物、城市风道、保持水土、净化地表水、雨洪管理等, 线性游步道
次生态廊道	$30 \text{ m} \geq$ 廊道宽度 $\geq 12 \text{ m}$	滨水绿地、带状防护绿地等	有一定生物多样性保护功能, 生态与社会服务比主廊道弱
林荫道	道路绿化覆盖率达到90%以上的道路	绿化良好的城市次干道、城市支路	防风固沙、除尘降噪、杀菌、调节微气候, 改善城市景观, 提供舒适步行环境

资料来源: 笔者自制。

生态与社会服务有着重大的研究价值与现实意义^[6]。本文从景观格局与城市生态、社会服务关联的视角切入, 应用生态学和绿色基础设施理论研究成果, 结合我国现行的绿地管理条例与规范, 提出了一套城市生态网络格局的量化分析与评价方法。应用这个评价方法, 可以对生态网络格局进行全面系统的量化分析, 总结网络存在的主要问题, 为改善网络结构、调整绿地系统规划、修复城市生态环境提供依据。

1 城市生态网络的景观格局评价方法

1.1 以景观格局指数为核心的评价体系

近年来生态学领域在区域尺度上已取得了一系列景观格局量化分析的研究成果^[7], 为城市尺度的格局评价提供了很好的借鉴^[8-9]。本文从绿地格局与生态、社会服务关联的视角出发, 依据景观生态学的“格局—过程”、“源—汇”理论^[10], 建立绿地格局的量化评价方法。

景观格局指数是指能够高度浓缩景观格局信息、反映其结构组成和空间配置特征的定量指标, 是进行景观格局分析的重要技术手段与方法^[11], 在描述城市绿地生态网络的结构特征和空间分布方面有很好的解释力^[12-13]。但同时近年来研究发现, 不同的格局指数反映了格局的不同侧面, 单一的格局指数往往很难对生态过程进行全面、准确的解释; 而通过对景观指数的联合应用, 发掘景观指数集合对生态过程的解释能力是景观空间格局分析的有效途径^[14]。本文通过构建网络构成、网络联通度、网

络服务职能3个指数集合来全面地量化描述绿地系统格局特征, 并对不同指数所代表的生态与社会服务意义进行联合分析与归纳, 从而得到生态网络格局的综合评价。

1.2 生态网络格局的识别

城市生态网络的景观格局表现出了高度人工化、高度的时空异质特性、破碎性、不稳定性特征^[15], 对生态网络进行格局识别是进行量化分析与评价的基础。本文以绿色基础设施理论提出的“枢纽斑块—生态廊道—小斑块”(Hubs—Links—Sites) 作为基础空间分析模型^[6], 识别出绿地网络的3级空间格局结构^①。景观生态学认为, 景观空间格局由斑块、廊道和基质这些基本单元组成; 不同单元功能各异, 而这些景观单元的空间分布与组合关系也深刻地影响着地区的物质、能量与信息的流动与迁移转化^[17]。生态网络是城市多种生态进程(包括空气净化、水土保持、生物多样性、水体净化等)的“源”与“汇”^[10]。

1.3 网络单元的分级

为进一步准确地辨别、分析景观格局, 这里依据其职能与生态重要性对网络单元进行分级评定(表1)。对生态斑块和生态廊道的分级主要参照《公园设计规范CJJ48—92》《国家生态园林城市标准》《城市园林绿化评价标准GB50563—2010》等国标、规范和相关的生态学领域的研究成果^[8, 18-20]。

1.4 评价指标体系

评估学理论认为, 评估调查数据的获取要依据评估目的和评估标准来确定^[21]。评价指标主要从近30年文献中出现次数超过5次的28个景观指数中选取^[12, 14, 22]。指标选取原则其一是指数对绿地生态过程和社会服务解释的有效性, 其二是指数描述城市绿地空间特征的契合性^[23-24]。评价体系以网络构成、联通性、服务职能3个指数集合作为一级指标, 以生态指向性明确的10个景观格局指数作为二级指标。

斑块:将不同类型与面积的斑块个数作为核心指标。相邻的斑块间存在着边缘效应, 即斑块相邻部分间的物质和能量交流远大于斑块内部, 选取使用频率最高的斑块形状指数(LSI)作为核心指标。

廊道:根据廊道的分类, 以长度和数量来评价廊道的连续性和影响力。

联通性:绿地网络特征的评价重点是网络联通性和组成单元关系。经过比较测算, 选取对绿地斑块变化反应明显的连通度(CONNECT)作为网络联通性度量指标; 选取聚合度(AI)来测量绿地斑块结构性连接性; 邻近距离指数(ENN-MN)测量绿地单元的聚合程度。

服务职能:主要衡量绿地在城市整体格局中的地位与影响, 从而判断网络的生态服务与社会服务职能。PLAND指数可以衡量绿地在城市整体格局中所占的优势程度, 斑块密度(包括廊道斑块)则可以反映出绿地在整个景观中的分布情况和可达性特征。通过测试计算, 选取蔓延度(CONTAG)作为评价绿地对整体格局影响的指标(表2)。

2 哈尔滨南岗区生态网络的格局分析与修复策略

2.1 研究区概述

本文研究案例为哈尔滨南岗区大秋林圈, 研究区域面积为11.6 km²(图1)。南岗区大秋林圈是哈尔滨城市最早的城市建设区, 承担着城市发展的核心职能。随着城市发展, 区域内绿地不断减少, 环境质量逐渐恶化, 难以很好地发挥城市核心区的作用。依据《哈尔滨市城市总

注释 ①也有研究将绿色基础设施分为“hubs-links”两级体系, 本文采用“Hubs-Links-Sites”3级体系, 是因为城市中心区绿地稀缺且破碎化严重, 众多小块绿地(Sites)为城市提供了重要的社会服务与生态服务。

表2 生态网络格局评价指标表

指数集合	指数名称	描述	生态表征
网络构成	斑块数量 (NP)	景观中所有绿地斑块的个数总和; $NP \geq 1$	NP值越大, 绿地个数越多, 可测量不同类型绿地斑块在网络中的比重
	斑块形状指数 (LSI)	通过计算某一斑块形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来测量其形状的复杂程度; $LSI \geq 1$	LSI值高则说明与周边环境存在着更多的物质和能量交流; 即绿地对周边区域的生态与社会服务更多、影响更大 ^[14]
	廊道长度 (TC) 廊道数量	某类廊道的总长度值; $TC \geq 0$ 地段内廊道的数量	TC值越大说明生态网络的连接度越高、整体性越强 廊道数量多则绿地网络的连通性好
网络联通性	聚集度 (AI)	其值计算基于同类型斑块间公共边界长度来计算, 对聚集的斑块簇群反应敏感; $0 \leq AI \leq 100$	AI 值大则说明某类型中所有像元间存在公共边界较多, 该类型斑块的聚合程度高, 结构联通性好 ^[14]
	连接性指数 (CONNECT)	具有功能性连接的斑块数量和可能产生连接的数量的比值的百分化; $0 \leq CONNECT \leq 100$	是表征斑块结构连接度的重要指标, 斑块间的距离阈值需设定; CONNECT值越大说明同类斑块连接的数量越多
	邻近距离指数 (ENN-MN)	度量同类斑块之间距离, 取其所有距离的平均值, 单位为m; $ENN-MN \geq 0$	反映景观中同一类斑块分布的集合程度, ENN-MN指数高, 表明斑块之间的集合程度低 ^[22]
网络服务职能	景观百分比 (PLAND)	某一斑块占整个景观的面积比例; $0 \leq PLAND \leq 100$	表明某一斑块在整个景观中占优势的程度
	斑块密度 (PD)	单位面积内的斑块个数 (包括绿地斑块和廊道斑块)	PD值高说明绿地数量较多, 分布较为分散
	蔓延度 (CONTAG)	解析格局的总体特征; 描述景观里斑块的连接程度或延展趋势; $0 \leq CONTAG \leq 100$	CONTAG值较大, 表明景观中的优势斑块类型形成了良好的连接; 反之, 则表明景观是具有多种要素的散布格局 ^[22]

资料来源:笔者自制。

体规划》(2011—2020) 提出的老城区“中兴”发展策略,受南岗区政府发改局委托,编制《南岗区绿地系统概念规划》(2014—2030),作为下一轮城市绿地系统规划修编的参照依据。

数据的筛选与分析在ArcGIS10.2中完成,评价指标计算使用Fragstats3.3。研究案例数据来源于南岗区绿地系统现状分布图和绿地系统规划概念图。现状绿地分布数据来源于哈尔滨公众地理研究所的土地二调GIS数据和现场调研补充数据。规划图数据来源于依据《哈尔滨市城市绿地系统规划(修编)》(2012—2020)编制的《南岗区绿地系统概念规划》(2014—2030),将《概念规划》的cad文件导入GIS系统,应用GIS的空间矫正模块对cad文件的空间坐标和拉伸变形进行矫正。

2.2 生态网络的景观格局分析

应用ArcGIS的数据筛选功能将分布不连续、面积较小、生态影响弱的小块绿地去掉,识别出南岗区的生态网络格局(图2)。通过对研究区域生态网络的景观格局分析(表3-表4),可以发现:

(1) 提供重要生态服务的枢纽斑块数量较少(5个),从分布来看,绿地斑块集中在地段西

南、中部与东北部,西北部与东南部缺乏生态斑块,分布非常不均匀;

(2) 生态主廊道长度短且不连续、不完整;马家沟河是区域内的主生态廊道,但65%的廊道宽度较窄;次要生态廊道数量少(1条)、长度短(729 m);林荫道分布较为散乱,连续性不强(3条,长7 464 m)。

(3) 生态网络破碎化严重,整体分布呈散点式;主生态廊道与次生态廊道没有形成完整的体系,生态廊道和生态斑块联通性较弱。

2.3 生态网络修复策略与结果分析

基于网络的格局分析,提出网络修复规划方案(图3)与修复策略,并通过景观格局指数软件Fragstats3.3计算(表3-表4),以对比分析的方法来说明生态网络修复后的格局变化。

2.3.1 增加绿地斑块与生态廊道

生态斑块与廊道是区域内调节生态过程中重要的“源”与“汇”。枢纽斑块(Hubs)从5个增加到9个,小斑块(Sites)从9个增加到13个;生态主廊道长度提高了622%,次廊道提高了2 338%,林荫道由3条增加到12条,长度由7 464 m增加到19 476 m。表征绿地斑块优势度的PLAND值由规划前的5.68变为

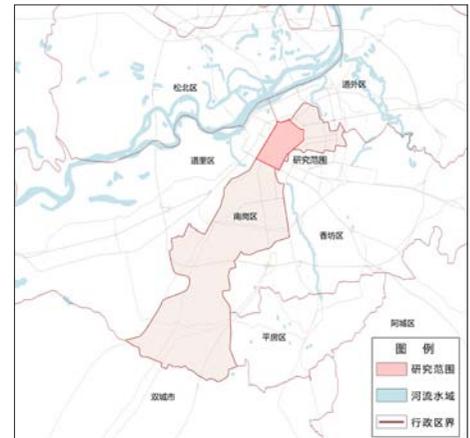


图1 研究案例区位图
资料来源:笔者自绘。

15.02,提高了164.4%,绿地总量的提高构成了提供地区生态服务和社会服务的基础。表征绿地斑块聚集程度的AI值变化不大。衡量景观斑块整体性的蔓延度由86.49变为69.50,下降了19.6%,说明绿地的增加已对整体景观格局产生影响,改变了城市优势斑块(建设区与道路)高度连接的现状。

2.3.2 提升网络连通度,将城区散点式网络结构升级为联通的半网络结构

规划后的生态网络以“一主三次”的生态廊道为骨架,以林荫道为辅助,加强廊道与

表3 格局指数评价结果(1)

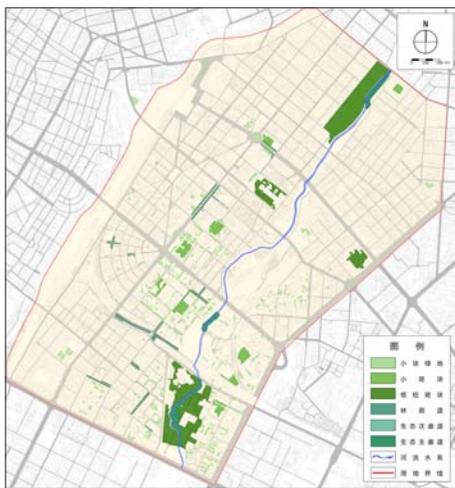
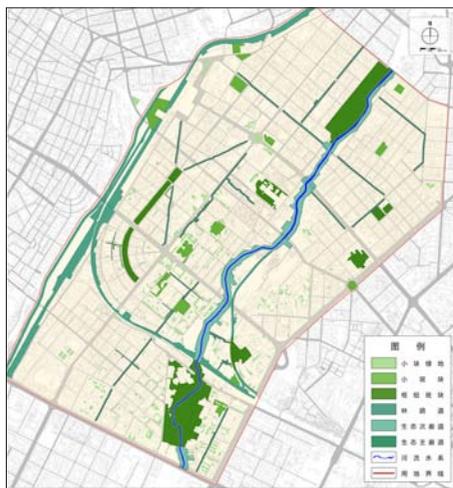
	枢纽斑块数量 (NP1)	小斑块数量 (NP2)	斑块形状指数 (LSI)	主廊道长度 (m) / 数量(条)	次廊道长度 (m) / 数量(条)	林荫道长度 (m) / 数量(条)
规划前	5	9	10.49	707/1	729/1	7 464/3
规划后	9	13	24.49	5 122/1	17 772/3	19 476/12

资料来源:笔者自制。

表4 格局指数评价结果(2)

	聚集度 (AI) (%)	连接性指数 (CONNECT) (%)	邻近距离指数 (ENN-MN)	景观百分比 (PLAND) (%)	斑块密度 (PD)	蔓延度 (CONTAG) (%)
规划前	97.94	3.33	105.09	5.68	0.35	86.49
规划后	98.17	5.26	57.47	15.02	1.38	69.50

资料来源:笔者自制。

图2 南岗区生态网络现状分布图
资料来源:笔者自绘。图3 南岗区生态网络修复规划图
资料来源:笔者自绘。

斑块的连接,构建了区域内较为连续的半网络结构。在连通度方面,衡量斑块距离的ENN-MN指数由105.09 m变为规划后的57.47 m,降低了45.3%;连接性指数由3.33变为5.26,提高了57.9%,表明绿地斑块集合度和绿地网络的互联互通有了较大提高。

2.3.3 改善网络服务职能

生态服务职能方面,LSI指数由10.49变为24.49,提高了133.5%,说明规划后绿地的与周边地区的公共边界更长,可以为城市提供更多生态服务。

社会服务职能方面,ENN-MN指数的降低了45.3%,说明相邻绿地的距离缩短;绿地斑块密度由0.35个/km²变为1.38个/km²,提高了294%,绿地距离的缩短和数量的增加提高了绿

地的可达性。中西部和东部新增的枢纽斑块和小斑块使得绿地分布的均匀性加强,方便了人们使用绿地。规划后形成沿大直街、松花江街、曲线街、花园街、果戈里大街5条主要生活性街道的林荫道网络,可以较好地改善地区内的人居环境和景观风貌。

3 结论

快速的城市化进程带来的生态人居环境恶化,已经成为我国城市面临的一个普遍问题。作为生态文明建设的重要组成部分,城市生态修复的必要性和迫切性日益凸显。在寸土寸金的城市建设区,通过空间格局的优化来提升生态网络的生态服务与社会服务具有重要的现实意义。通过研究,本文取得了以下发现:

(1) 应用景观生态学和绿色基础设施理论,以格局指数为核心指标,提出了城市生态网络空间格局的量化分析方法;

(2) 以哈尔滨南岗区秋林圈为典型案例,提出了改善网络单元构成、提高网络联通度、强化网络服务职能的城市生态网络修复策略。

生态网络格局分析方法为分析城市绿地系统的空间分布存在的问题、规划方案比选、绿地格局的定量考核提供了技术手段。生态网络修复的研究可以在城市绿地的调研分析、城市绿地系统规划、城市生态管理与决策等不同领域得到应用。

城市生态网络具有空间异质性强、生态过程复杂、人为扰动性强等特征,并同时承担着改善生态、防灾避险、休憩娱乐、文化审美等多重职能,以上因素决定了生态网络修复是一个复杂的研究课题,需要不断深化研究,改善我们共同生活的城市人居环境。

参考文献 References

- [1] MILLENNIUM E A. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment[Z]. Washington D C: Island Press, 2003.
- [2] 金云峰,王小辉. 绿地资源及评价体系研究与探讨[J]. 城市规划学刊, 2014 (1): 106-111.
JIN Yunfeng, WANG Xiaoye. Research and discussion on green resources and evaluation system[J]. Urban Planning Forum, 2014(1): 106-111.
- [3] 陈利顶,孙然好,刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33 (4): 1042-1050.
CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian. Research progress on ecological environmental effect of urban landscape pattern evolution[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [4] 李锋,叶亚平,宋博文,等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例[J]. 生态学报, 2011 (19): 5623-5631.
LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al. Spatial structure of urban ecological land and dynamic evolution of ecosystem services: a case study of Changzhou

- City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(19): 5623-5631.
- [5] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏, 等. 城市绿地空间格局及其环境效应——以宜昌市中心城区为例[J]. *生态学报*, 2004 (2): 186-192.
ZHOU Zhixiang, SHAO Tianyi, TANG Wanpeng, et al. Spatial pattern of urban green space and its environmental effects: a case study of central city of Yichang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004(2): 186-192.
- [6] 孔繁花, 尹海伟. 城市绿地功能的研究现状、问题及发展方向[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2010 (3): 119-124.
KONG Fanhua, YIN Haiwei. Research status, problems and development direction of urban greenfield function[J]. *Journal of NanJing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2010(3): 119-124.
- [7] 陶宇, 李锋, 王如松, 等. 城市绿色空间格局的量化方法研究进展[J]. *生态学报*, 2013 (8): 2330-2342.
TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, et al. Research progress on quantifying urban green spatial pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013(8): 2330-2342.
- [8] 宋治清, 王仰麟. 城市景观及其格局的生态效应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2004 (2): 97-106.
SONG Zhiqing, WANG Yanglin. Research progress on ecological effects of urban landscape and its patterns[J]. *Progress in Geography*, 2004(2): 97-106.
- [9] 齐杨, 鄢建国, 李建龙, 等. 中国东西部中小城市景观格局及其驱动力[J]. *生态学报*, 2013 (1): 275-285.
QI Yang, WU Jianguo, LI Jianlong, et al. Landscape pattern and driving force of small and medium-sized cities in east and west of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013(1): 275-285.
- [10] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武, “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2006, 26 (5): 1444-1449.
CHEN Liding, FU Bojie, ZHAO Wenwu. Location-weighted landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [11] 朱战强, 党安荣, 李树华, 等. 基于空间信息技术城市景观生态格局规划研究[J]. *城市规划*, 2013 (9): 34-38.
ZHU Zhanqiang, DANG Anrong, LI Shuhua, et al. Study on urban landscape ecology planning based on spatial information technology[J]. *City Planning Review*, 2013(9): 34-38.
- [12] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价[J]. *地理研究*, 2009 (2): 284-292.
WANG Yuncai. Evaluation of connectivity of urban landscape ecological network in Shanghai[J]. *Geographical Research*, 2009 (2): 284-292.
- [13] 刘滨谊, 贺炜, 刘颂. 基于绿地与城市空间耦合理论的城市绿地空间评价与规划研究[J]. *中国园林*, 2011 (5): 42-46.
LIU Binyi, HE Wei, LIU Song. Study on the evaluation and planning of urban green space based on the coupling theory of green space and urban space[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2011(5): 42-46.
- [14] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. *生态学报*, 2008 (11): 5521-5531.
CHEN Liding, LIU Yang, LYU Yihe, et al. Pattern analysis in landscape ecology: present situation, dilemma and future[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(11): 5521-5531.
- [15] 李伟峰, 欧阳志云, 王如松, 等. 城市生态系统景观格局特征及形成机制[J]. *生态学杂志*, 2005 (4): 428-432.
LI Weifeng, OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, et al. Characteristics and formation mechanism of urban ecosystem landscape pattern[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005(4): 428-432.
- [16] 裴丹. 绿色基础设施构建方法研究述评[J]. *城市规划*, 2012 (5): 84-90.
PEI Dan. Review on the research of green infrastructure construction method[J]. *City Planning Review*, 2012(5): 84-90.
- [17] 许文斐, 孙翔, 朱晓东, 等. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别[J]. *生态学报*, 2012(4): 260-268.
XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al. Identification of important ecological patches in Nanjing Main City based on ecological network analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012(4): 260-268.
- [18] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. *生态学报*, 2005 (9): 2406-2412.
ZHU Qiang, YU Kongjian, LI Dihua. Ecological corridor width in landscape planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005(9): 2406-2412.
- [19] LI F, WANG R, PAULUSSEN J, et al. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 72(4): 325-336.
- [20] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望[J]. *生态学报*, 2014(1): 190-200.
LI Feng, WANG Rusong, ZHAO Dan. Urban ecological infrastructure based on ecosystem services: current situation, problems and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014(1): 190-200.
- [21] 赖因哈德·施托克曼, 沃尔夫冈·梅耶. 评估学 (第一版) [M]. 北京: 人民出版社, 2012.
TUOKEMAN R, MEYER W. Assessment (first edition) [M]. Beijing: People's Publishing House, 2012.
- [22] KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010(95): 16-27.
- [23] 陈春娣, 荣冰凌, 邓红兵. 欧盟国家城市绿色空间综合评价体系[J]. *中国园林*, 2009 (3): 66-69.
CHEN Chundi, RONG Bingling, DENG Hongbing. Comprehensive evaluation system of green space in European Union Cities[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2009(3): 66-69.
- [24] 刘佳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J]. *生态学报*, 2018 (6): 4363-4372.
LIU Jia, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Optimization of green infrastructure pattern in Nanjing City based on circuit theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018(6): 4363-4372.