基于“三生”协调的郑州森林生态系统评价管理*

Research on Urban Forest Ecosystem Evaluation and Management Based on the Coordination of "Ecological-production-living space"

张　煜　张淑梅　何瑞珍　邢露华　王　莹　赵晓玉　田国行
ZHANG Yu, ZHANG Shumei, HE Ruizhen, XING Luhua, WANG Ying, ZHAO Xiaoyu, TIAN Guohang

摘　要 森林生态系统评价是“三生”协调下森林可持续经营与管理的重要前提，以郑州国土空间为研究尺度，基于ArcGIS平台，从生态敏感性、生态恢复力及城市建设3个方面，选择25个指标，运用ARCGIS软件的层次分析法（AHP），建立三生空间协调分布下的森林生态系统复合评价体系并开展评价。结果表明：适宜建设开发区面积为2 246 km²，占29.90%；近郊生态缓冲区面积为3 707 km²，占49.36%；远郊生态保育区面积为1 558 km²，占20.74%，并提出相应的经营管理措施。试图从国土空间规划角度出发，统筹空间区划下的城市森林生态系统开发与保护、投入与效益，为森林资源保护、培育、恢复、营造和管理提供重要的调控理论及决策依据。

Abstract Forest ecosystem evaluation is an important prerequisite for sustainable forest management. Based on the ArcGIS analysis, this paper takes Zhengzhou as an example, choosing 25 indicators from ecological sensitivity, ecological resilience, and urban construction. A comprehensive evaluation system of the GIS-AHP forest ecosystem under the coordinated distribution of the ecological-production-living spaces is established and evaluated. The results show that the suitable construction and development area is 2 246 hm², accounting for 29.90%; the suburban ecological buffer area is 3 707 hm², accounting for 49.36%; the suburban ecological conservation area is 1 558 hm², accounting for 20.74%. Corresponding management measures are also proposed. From the perspective of territory spatial planning, aiming to coordinate the development and protection of urban forest ecosystems, this paper provides theories and decision-making basis for forest resource protection, cultivation, restoration, construction, and management.

关 键 词 城市森林生态系统评价；三生空间；生态敏感性；生态恢复力；郑州市
Key words urban forest ecosystem evaluation; ecological-production-living space; ecological sensitivity; ecological resilience; Zhengzhou

文章编号 1673-8985（2020）01-0048-07　中图分类号 TU981　文献标志码 A　　DOI 10.11982/j.supr.20200109

作者简介

张　煜
河南农业大学河南省高校学科创新引智基地
助理研究员，硕士
张淑梅
河南农业大学林学院 讲师，博士研究生
何瑞珍
河南农业大学林学院 副教授，博士
邢露华
河南农业大学林学院 硕士研究生
王　莹
河南农业大学林学院 硕士研究生
赵晓玉
河南农业大学林学院 硕士研究生
田国行（通信作者）
河南农业大学林学院 教授，博士生导师

城市森林生态系统是城市地域内为促进人与自然协调，以树木为主体的植被及其所在人文自然环境构成的森林生态系统[1-2]，具有调节气候、涵养水源、保持水土等重要生态调节功能[3]；维持生物多样性、固碳释氧等生态支持功能；提供林业各类产品的生产功能；为区域城市居民提供人类活动、身心健康的文化服务功能[4]。早在1912年，美国林学家Mell就预见性地提出“林学家的阵地就在城市”。20世纪60年代，“城市森林”概念首先在北美提出、形成并得到认可。我国于20世纪80年代后期引进城市森林概念，并很快在国内得到认同，90年代后期即进入理论和实践并重的发展阶段。党的十八大以来，以生态文明改革为指导思想，陆续开展了对国土空间规划的探索。2018年组建自然资源部，对自然资源开发利用和保护进行监管，标志着我国实现“多规合一”、建立国土空间规划体系的改革已进入全面系统的落实阶段，与此同时，城市森林建设与发展也成为“山水林田湖草生命共同体”的重要组

*基金项目：河南省交通厅科技合作项目“高速公路景观的稳定性和可持续性研究”（编号2014Z06）；“河南省路域景观绿地资源整合提升和生态管控关键技术研究与示范”（编号2015J02）；河南省高校学科创新引智基地“城乡绿地资源调控与景观生态设计学科创新引智基地”（编号GXJD006）；2019年度人文社会科学研究项目“基于综合量化分析郑州市建成区绿地资源的公平性与时效性”（编号2019-ZZJH-422）资助。

成部分。城市森林生态系统规划作为国土空间规划的专项规划，是国土空间规划的重要“支撑”，是生态红线划定的基本依据。此专项规划如果能前置，国土空间规划中的生态红线的划定就更加科学合理。围绕国土空间统筹布局，发挥国土空间规划对专项规划的指导，并利用其他各类生态专项规划实现“刚弹相济”的治理和传导体系，以“三类五级”的体系为纲，国家和省级管理部门严格控制“三生空间”的规模总量，刚性治理；市县乡要精准、科学、合理地进行规划落地，通过结构的确定实现弹性传导。

近年来，随着郑州市人口的持续增长、高强度的国土开发建设，早期森林资源粗放的经营管理方式以及城市空间急剧扩张对生产、生态空间的不断侵蚀，使得部分地区森林生态系统退化严重。森林生态系统退化导致自然的景观格局、植被结构及生态过程受到极大改变与破坏[5-7]，呈现森林面积减少、林分结构单一、初级生产力降低、生物多样性下降等广泛且多形式的森林持续退化问题，影响了郑州生态系统服务功能[8]；并呈现人为干扰严重、人工景观化、斑块破碎化严重的特征[9]。同时，人类对森林生态系统服务和森林各类资源的需求不断增长的同时也在发生转变，既要求城市森林满足人们的休闲游憩和文化旅游需求，又需要维护动物栖息地、保护区域生态系统稳定性与完整性。这些职能的重叠、定位的冲突、经营管理的混乱对国土空间的协调发展产生极大的负面影响。如何以森林生态系统评价为基础，以承载、服务城市的目标为导向，进而精准地进行功能区划、科学地开展经营管理，对“三生”协调下的区域生态建设与保护具有重要意义。

面对长期受退化威胁的城市森林生态系统，国内外学者从城市森林生态系统退化的扰动原因、退化生态系统结构与功能的动态发展、恢复目的与方式、生态系统弹性及维持其生物多样性与生态系统结构和功能的能力等多方面[10-17]开展评价，如任海等从生态系统的自组织力、抵抗能力、适应能力为受冰雪冻灾干扰下的退化亚热带林生态系统建立恢复力评价体系[18]；战金艳等从生境条件和生态存储两方面选择26个指标对江西省莲花县森林生态系统恢复力开展分析[19]1304；李丽等从气候、土壤、地形、人类干扰、生态存储5个方面定量评估森林生态系统自组织力、灾害抵抗能力与适应能力[20]19。亦有学者从区域生态系统在遭受外界干扰时，产生生态环境问题的频率与程度开展分析[21]103, [22-24]，如熊善高等结合生态敏感性评价与生态系统服务功能划定南宁市生态空间[25]1；杨远秦等基于生态敏感性及生态系统服务功能构建区域生态安全格局并提出分区建设开发建议[26]。

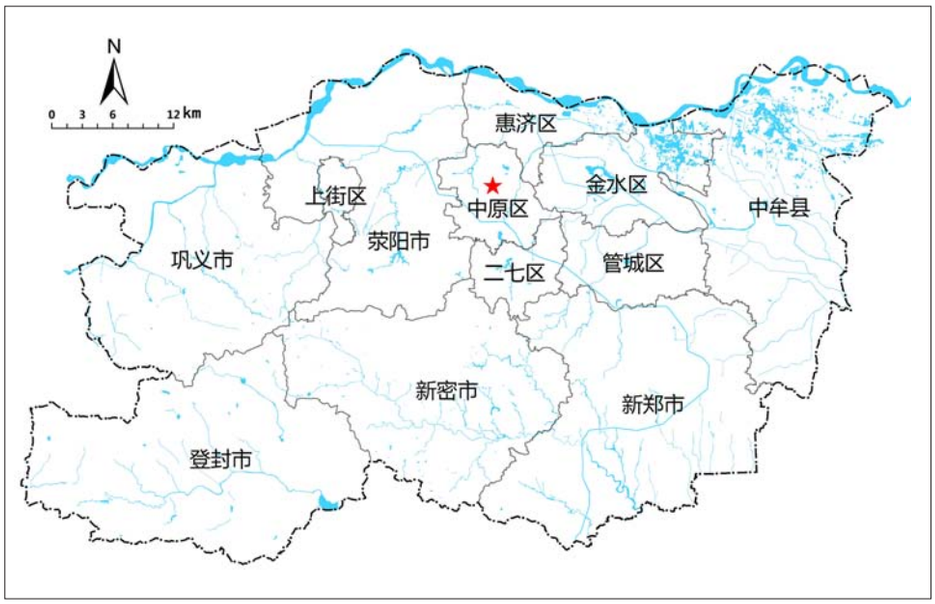

图1　郑州市行政区划示意图
资料来源：笔者自绘。

1　研究区概况

郑州是河南省省会城市，市域总面积为7 511 km²①，截至2017年，常住人口约988.1万人[27]，地处华北平原南部、黄河下游地带。属北温带半干旱季风型大陆性气候，年平均气温为14.4℃，年平均降雨量为640.9 mm。研究区地形西部高，东部低，中部高，东北、东南低，地势呈阶梯状，从中山—低山—丘陵—平原逐渐过渡，主要山体有嵩山、具茨山、大熊山、氓岭等（见图1）。研究区土壤以褐土、潮土为主，4个土类9个亚类均有。大小河流124条，流域面积较大的河流有29条，分属于黄河和淮河两大水系。

郑州市在植物区系划分上属于暖温带落叶阔叶林植被型，全市绿化面积达到251 300 hm²。其中，现有绿地面积为14 400 hm²，林业用地面积为236 900 hm²，森林覆盖率达到33.36%，活立木蓄积量为1 443.4万m³，生态公益林面积达到133 300 hm²，占林业用地面积的56.13%，约有树种178科、941属、2 302种。研究区西部沿黄河分布以泡桐为主的用材林及以枣树、核桃为主的经济林；北部沿黄河两侧分布以欧美杨、刺槐、柏木、其他软阔类为主的水土保持林、防风固沙林和其他防护林地，以及以石榴为主的经济林，是研究区重要的绿色屏障；东部黄淮平原地区主要分布以欧美杨、刺槐、白蜡为主的用材林及以欧美杨、刺槐为主的防风固沙林；研究区西南部地形以低山—中山为主，植被资源丰富，主要森林资源是以油松、火炬松、栎类、榆树、刺槐为主的水土保持林、水源涵养林以及以山皂角、核桃为主的经济林；在研究区南部丘陵地区主要分布以欧美杨、刺槐、柏木为主的一般用材林和以毛白杨为主的速生丰产用材林，是重要的商品林经营区。本文以郑州市域国土空间为尺度开展城市森林

注释　① 该面积含原郑州市域7 446 km² 以及原属开封市尉氏县，现划交郑州市的部分区域，合计7 511 km²。

表1　城市森林生态系统评价指标权重表

目标层	权重	准则层	权重	指标层	权重
生态敏感性	0.4955	植被与保护区因子	0.1922	自然保护区	0.0520
				森林公园	0.0403
				风景名胜区	0.0358
				缓冲区	0.0309
				NDVI	0.0331
		水系因子	0.1664	湿地公园	0.0539
				河流、水库、南水北调工程	0.0470
				湖泊、沟渠、水产养殖场及景观水体	0.0365
				缓冲区	0.0290
		地形因子	0.0757	坡度	0.0348
				起伏度	0.0409
		水土流失因子	0.0611	土壤侵蚀	0.0393
				矿产采掘区	0.0218
生态恢复力	0.3072	生态储存	0.2304	郁闭度	0.0499
				龄组	0.0496
				平均胸径	0.0411
				每公顷株数	0.0278
				斑块面积	0.0620
		立地条件	0.0384	海拔	0.0196
				坡度	0.0085
				坡向	0.0102
			0.0384	年平均气温	0.0192
				年平均降雨量	0.0192
城市建设	0.1974	城市建设	0.1974	人口数量	0.1076
				交通区位	0.0897

资料来源：笔者自制。

生态系统经营体系研究，虽然不完全符合相关学者对城市森林的研究范围界定，但符合现代林业理念且从政府部门保护、开发、养护、管理的实际出发，更易于统筹开展与落实。

2　研究方法

2.1　数据来源及处理

本文采用的遥感影像为2017年Landsat 8 OLI_TIRS卫星遥感数据，分辨率为30 m×30 m，出自地理空间数据云网站（http://www.gscloud.cn）。通过遥感原始数据的波段组合、几何校正及配准、图像剪裁等方法获得研究区遥感影像。以此为基础，借助ENVI软件，通过归一化处理得到归一化植被指数NDVI；并使用地理空间数据云网站分辨率30 m×30 m的数字高程模型DEM数据，由DEM数据计算高程、坡度、坡向指标。

通过实地考察，结合行政区划、城市总体规划、绿地系统规划、郊野公园专项规划等相关资料，以遥感影像图为底图，绘制现状自然保护区、森林公园、风景名胜区等斑块现状位置与边界；土壤图为河南土壤地理编委会编制的1:1 000 000河南省土壤图；气候数据是通过对国家气象站点多年监测数据进行插值而得到；基于遥感数据，结合地形、降雨、土壤等因子，使用通用土壤侵蚀方程（USLE），计算平均侵蚀模数；基于郑州市林地变更数据库，以符合林地变更调查规范的大量实地野外调查为补充，获取郁闭度、龄组等数据，计算研究区生态储存；人口空间分布数据来源于中科院资源环境科学数据中心网站（http://www.resdc.cn），该数据是基于各县市的人口普查数据，结合土地利用类型、夜间灯光亮度、居民点密度进行空间化处理而得到[28]。

2.2　指标评价体系构建

评价体系以“三生空间”评价识别[25]4, [29,30]为基础，结合森林生态系统评价体系，借鉴生态保护红线划定技术指南的方法与成果，从生态敏感性、生态恢复力、城市建设3个方面构建“三生”协调下的城市森林生态系统复合评价模型。

2.2.1　数据归一化

评价指标体系中各评价因子量纲不同，因此在ArcGIS中首先对数据进行栅格化处理，将其统一转化成30 m×30 m的栅格数据，然后进行归一化处理。本文对正向和负向评价指标分别按公式（1）、（2）进行归一化处理，公式如下：

$$\overline{X}_{ij} = (X_{ij} - X_{min})/(X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

$$\overline{X}_{ij} = (X_{max} - X_{ij})/(X_{max} - X_{min}) \quad (2)$$

式中：X_{ij}为第i个评价指标的第j个栅格归一化值，X_{ij}为第i个评价指标的第j个栅格值，X_{max}为i评价指标的栅格最大值，X_{min}为i评价指标的栅格最小值。

2.2.2　权重计算

评价权重影响研究结果的正确程度，本文采用AHP层次分析法，结合相关文献研究[19]1306, [20]21, [21]104, [31]以及专家打分构建判断矩阵，确定各指标权重，并通过一致性检验，具体指标及权重详见表1。

2.3　评价方法

本文采用综合评价指数法，以30 m×30 m为栅格数据单元，使用ArcGIS软件的地图代数功能对栅格化的各项评价指标进行空间叠加，分别计算研究区的城市森林生态系统敏感性、生态恢复力以及城市建设评价的空间分布规律的定量化描述。

$$a = \sum_{i=1}^{n} w_i X_i \quad (3)$$

式中：a为目标层指标生态敏感性、生态恢复力、城市建设的指标值，W_i为i评价指标的权重，X_i为i评价指标归一化值。

在ArcGIS中使用地图代数功能，对生态敏感性、生态恢复力和城市建设进行叠加分析，采用ArcGIS自然断点法将分析结果划分为

城市适宜建设区、近郊生态缓冲区和远郊生态保育区。

3 结果与分析

3.1 生态敏感性评价

本文选取植被与保护区、水系、地形、水土流失4个影响因子，对生态敏感性进行综合评价。结果显示，最高值为0.1578，位于研究区中部嵩山、浮戏山以及北部黄河地区，最低值广泛分布于研究区南部、东部，空间分布上呈显著差异，敏感性空间从西南山地及北部沿黄河区域向中部郑州市建成区递减过渡（见图2）。植被与保护区因子最高值为0.0844，高度敏感区主要沿黄河以及西南伏牛山脉、箕山山脉分布，包括黄河湿地自然保护区，嵩山国家森林公园、始祖山国家森林公园等森林公园以及植被繁茂地区。地形因子最高值为0.0735，高度敏感区主要沿研究区山脉分布，包括坡度25°以上以及起伏度90°以上地区。该地区生境条件极端，对外界变化活动极度敏感。水土流失因子高度敏感区主要位于研究区西南山地地区，该地区山体为土石山，受降雨影响强烈，部分地区土壤侵蚀模数较高，同时金属矿场、煤矿场以及采石场也使得周边地区地貌、植被遭到严重破坏，水土流失严重。将各影响因子叠加后，高敏感区主要分布于研究区北部沿黄河地区、登封市与中牟县北部、巩义市东部、新密市北部及南部。

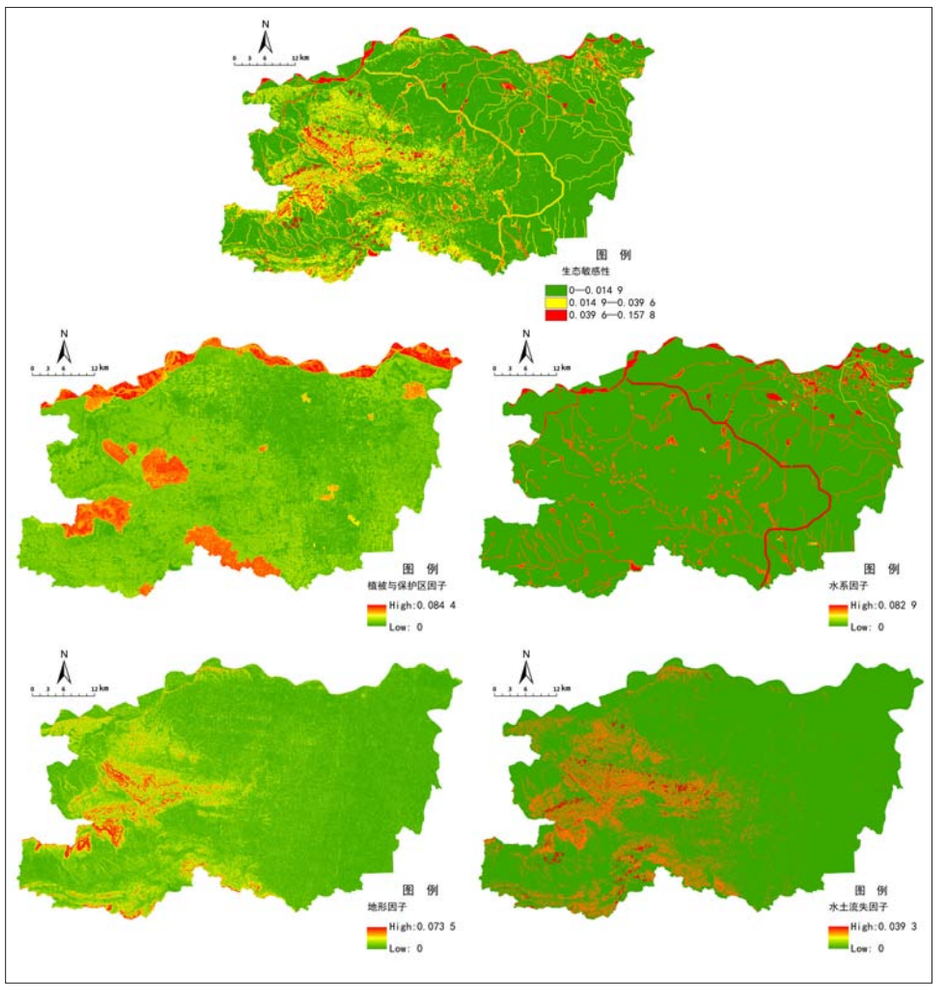

图2 郑州生态敏感性分布图
资料来源：笔者自绘。

3.2 生态恢复力评价

生态储存与立地条件是生态恢复力的重要影响因素，研究区生态恢复力自中部向西南呈现逐步上升趋势，最高值为0.1755，位于研究区西南部伏牛山脉及箕山山脉地区，研究表明西南部比东部地区更加稳定（见图3），值为0.046—0.086的区域占大多面积。研究区属北温带半干旱季风型大陆性气候，气温自西向东呈递减趋势，降雨自北向南递增，西南部海拔较高，以中山、低山地形为主，降雨充沛，雨水资源丰富，生境环境较好，利于植被生长。该地区植被覆盖率较高，分布以油松、火炬松、栎类、榆树、刺槐为主的乔木林和灌木林等，植物多样性丰富，植被类型多种多样，树种结构合理，林龄以幼龄、中龄、近熟林为主，生物多样性丰富，生态系统的自我调节能力较强，在受到外界干扰后能迅速恢复。东部地区地势平坦，城市建成区的建设开发以及农田林网受侵蚀破坏的影响使得植被覆盖率较低，林地生态恢复力较差，值为0.001左右，无人工管理养护，极易发生退化。

3.3 城市建设评价

研究区城市建设评价结果如图4所示，城市建设强度越大，开发建设活动越剧烈，城市森林生态系统受其影响导致的生态系统退化越容易发生。因此，城市建设干扰值越大，生态系统受到的压力越大，反之亦然。城市建设最高值为0.1973，位于郑州市建成区，包括中原区、二七区以及金水区，较大值地区主要位于上街区、巩义市、荥阳市，以及新密市，评价值在0.0394—0.1006之间。该区域人口较为密集，城市化程度较高，道路密度大，交通便利，土地资源较为紧张，同时经济水平较高，其城市建设处于较高水平（见图4）。登封市与中牟县产业以农业为主，农田及林地占区域面积比例较高，该区域人类活动水平较低。

3.4 分区划定

对研究区的生态敏感性、生态恢复力、城

表2　研究区复合评价分区结果

序号	类型	面积/km²	比例/%
1	适宜建设开发区	2 246	29.90
2	近郊生态缓冲区	3 707	49.36
3	远郊生态保育区	1 558	20.74

资料来源:笔者自制。

市建设评价结果进行叠加分析,采用ArcGIS自然断点法,对其进行城市森林生态系统空间区划（见表2),分为适宜建设开发区、近郊生态缓冲区和远郊生态保育区3种类型(见图5)。

3.4.1　适宜建设开发区经营管理建议

适宜建设开发区面积为2 246 km²,占研究区总面积的29.90%,主要分布于研究区中部,以郑州中心城区为核心沿道路辐射连接各县市的建成区,是区域的主要人类生活空间,处于“低敏感、低恢复、高压力”状态。该区域以天然林为代表的自然植被群落被人工园林绿化所取代,城市森林以城市绿地、人工园林树种群落为主要存在形式,其原始的水气通透的自然生境被大规模不透水硬质铺装取代,土壤板结化严重,生境恶劣,同时由于城市园林景观效果、人文表达、抗性防护的功能需求,在树种选择过程中依赖人为选择,其林地种类较少,结构、林分单一,生态恢复力较差,极度依赖人工养护管理,属“高投入,低生态回报”区域。在该区域应积极改良土壤以改善植被立地条件,丰富林地种类与结构,增强生物多样性,应保障养护管理资金投入,提高养护水平,并积极通过垂直绿化、屋顶绿化多种形式增加绿地数量、提升绿地质量、提高生态效益,形成绿地结构科学、功能完整的生态网络体系,有效改善人居环境。

3.4.2　近郊生态缓冲区经营管理建议

近郊生态缓冲区面积为3 707 km²,占研究区总面积的49.36%,比例最高,主要位于巩义西部、荥阳北部以及中牟、新郑、新密的平原地区,以生产空间为主,位于适宜建设开发区以及远郊生态保育区之间。该区域处于“中敏感、中恢复、中压力”状态。区域内林地围绕斑块分散的城镇及农业用地,以农田林网及四旁树为主要存在形式,长期以来受农

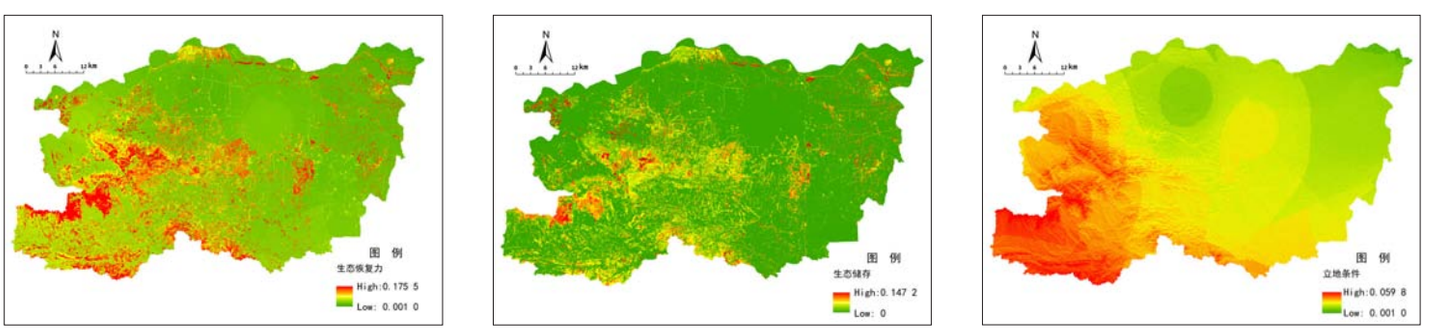

图3　郑州生态恢复力分布图
资料来源:笔者自绘。

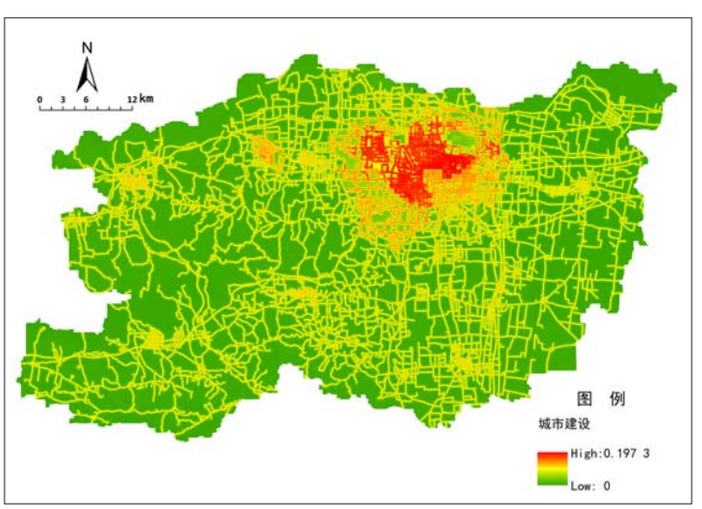

图4　城市建设分布图
资料来源:笔者自绘。

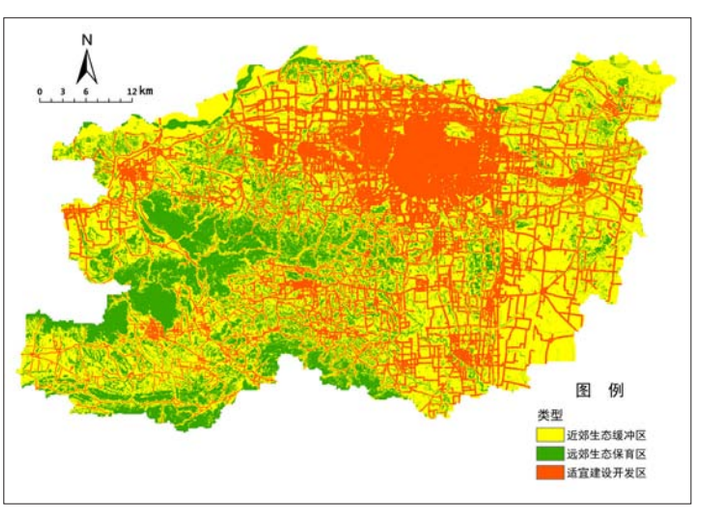

图5　研究区复合评价分区图
资料来源:笔者自绘。

业活动、村镇建设、城市扩张的严重威胁，较容易受到城市建设干扰，是区域森林生态系统的重要缓冲区，属“中投入，中生态回报”区域。该区域应在基本农田保护的基础上，以保护四旁树、完善农田林网体系为出发点，重建复合农林业生态系统，同时围绕用地紧张的建成区，在生活空间外部建生态廊道体系、满足居民休闲需求，结合郊野公园、森林公园体系，构建国土空间尺度下绿色基础设施网络体系。

3.4.3　远郊生态保育区经营管理建议

远郊生态保育区面积为1 558 km²，占研究区总面积的20.74%，位于区域中部伏牛山脉的嵩山—浮戏山以及位于区域西北部的氓岭山地，包括西南箕山山脉的大熊山—香山—始祖山，是区域的重要生态涵养源地。该区域分布大量以自然山体为依托的森林公园、自然保护区、风景名胜区等，植被覆盖度较高、结构复杂、生物多样性丰富，水土条件优渥，生境条件良好，具有较强的生态恢复力，处于“高敏感、高恢复、低压力”状态。受益于良好的生境条件与林地结构，该区域为“低投入，高生态回报”区域，在该区域应当严格控制土地管理与有关政策法规，原则上禁止一切建设活动，针对区域存在的大量天然林斑块，应当实行严格的封禁措施，采取封山育林等措施，维持林分结构异质性，对区域轻度退化的天然次生林，应当使其依托自身良好的恢复能力，在没有外界干扰的条件下自然恢复或自然演替为地带性森林植被，使其在自然条件下增加森林覆盖率、提升森林质量、保护森林生态系统的完整性，强化森林生态系统水源涵养、保持水土、生物多样性保护功能，构建郑州绿色屏障。

4　结论与讨论

运用ArcGIS软件的层次分析法，建立“三生”空间协调分布下的森林生态系统复合评价体系，开展评价，划定适宜建设开发区、近郊生态缓冲区、远郊生态保育区。适宜建设开发区位于研究区中部平原，以郑州中心城区为核心，以生活空间为主，属“高投入，低生态回报”区域，森林生态系统建设应积极改善林地生境、增加绿量、增强养护管理保障、构建科学生态网络体系，有效改善宜居环境；近郊生态缓冲区以西北部及东部平原地区的生产空间为主，是城市空间的外部延伸，是森林生态系统的重要缓冲区，属“中投入，中生态回报”区域，可进行适度开发，控制建设强度；远郊生态保育区位于研究区西南山地，以生态空间为主，是区域重要的生态涵养源地，为以城市空间为核心的区域发展提供生态承载支持，属“低投入，高生态回报”区域，应当实行严格的封禁措施，使其自然恢复与演替。城市森林生态系统结构与功能较为复杂，不同角度的评价指标选择有所差异。本文在前人研究的基础上，选择25个指标，这在一定程度上影响了评价结果。

郑州中心城区建成区面积从1999年的124.5 km²增长到2017年的500.8 km²，城市尺度的不断扩张对区域生产、生态空间产生重要影响，郑州目前已被国务院确认为国家中心城市，在未来城市化率继续增长、生态空间发展受限的背景下，森林生态系统的承载能力、服务功能如何以协调郑州大都市区发展为目标导向，构建自然森林空间与城市空间耦合的空间关系，是研究的重要立足点。在接下来的工作中，应结合国土空间规划的“双评价体系”，从不同尺度、不同空间类型统筹开展，使森林生态系统结构、格局、规模发展与规划建设相结合，发挥其生态系统最大效益。

参考文献 References

[1] 王成，蔡春菊，陶康华. 城市森林的概念、范围及其研究[J]. 世界林业研究，2004，17（2）：23-27.
WANG Cheng, CAI Chunju, TAO Kanghua. The concept, range and research area of urban forest[J]. World Forestry Research, 2004, 17 (2): 23-27.

[2] 何兴元，金莹杉，朱文泉，等. 城市森林生态学的基本理论与研究方法[J]. 应用生态学报，2002，13（12）：1679-1683.
HE Xingyuan, JIN Yingshan, ZHU Wenquan, et al. Basic theory and research method of urban forest ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (12): 1679-1683.

[3] 李锋，刘旭升，王如松. 城市森林研究进展与发展战略[J]. 生态学杂志，2003，22（4）：55-59.
LI Feng, LIU Xusheng, WANG Rusong. Advances in urban forest and its development strategies research[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22 (4): 55-59.

[4] 肖强，肖洋，欧阳志云，等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报，2014，34（1）：216-223.
XIAO Qiang, XIAO Yang, OUYANG Zhiyun, et al. Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (1): 216-223.

[5] 姚鑫，赵敏. 城市化对城市森林组成和结构的影响——以上海“城—郊”样带为例[J]. 自然资源学报，2017，32（7）：1113-1124.
YAO Xin, ZHAO Min. The impact of urbanization on the composition and structure of urban forest[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (7): 1113-1124.

[6] 尹锴，赵千钧，崔胜辉，等. 城市森林景观格局与过程研究进展[J]. 生态学报，2009，29（1）：389-398.
YIN Kai, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al. Progresses in urban forest and landscape pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (1): 389-398.

[7] 郭雪艳. 上海城市森林多尺度生态质量评价研究[D]. 上海：华东师范大学，2017.
GUO Xueyan. Multi-scale assessments on ecological quality of urban forest in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

[8] 段彦博，雷雅凯，马格，等. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征[J]. 浙江农林大学学报，2017，34（3）：511-519.
DUAN Yanbo, LEI Yakai, MA Ge, et al. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Zhengzhou[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017, 34 (3): 511-519.

[9] 穆博，李华威，姚恩民，等. 郑州市域不同地形位上城乡景观格局动态变化[J]. 河南农业大学学报，2016，50（6）：789-798.
MU Bo, LI Huawei, YAO Enmin, et al. Dynamic changes of urban-rural landscape spatial pattern in different topographic features in Zhengzhou City[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50 (6): 789-798.

[10] 徐欢，李美丽，梁海斌，等. 退化森林生态系统评价

指标体系研究进展[J]. 生态学报，2018，38（24）：9034-9042.
XU Huan, LI Meili, LIANG Haibin, et al. Review of the evaluation index system for degraded forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (24): 9034-9042.

[11] 马姜明，刘世荣，史作民，等. 退化森林生态系统恢复评价研究综述[J]. 生态学报，2010，30（12）：3297-3303.
MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al. A review on restoration evaluation studies of degraded forest ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (12): 3297-3303.

[12] 田甜，白彦锋，张旭东，等. 森林恢复、国内森林恢复面临的问题及应对措施[J]. 西北林学院学报，2019（5）：269-272.
TIAN Tian, BAI Yanfeng, ZHANG Xudong, et al. Problems and countermeasures in forest restoration in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019 (5): 269-272.

[13] CHAPIN F S, KOFINAS G P, FOLKE C, et al. Resilience-based stewardship: strategies for navigating sustainable pathways in a changing world[M]// FOLKE C, KOFINAS G P, CHAPIN F S. Principles of ecosystem stewardship. New York: Springer, 2009: 319-337.

[14] CARPENTER S, WALKER B, ANDERIES J M, et al. From metaphor to measurement: resilience of what to what?[J]. Ecosystems, 2001, 4 (8): 765-781.

[15] FISCHER J. Integrating resilience thinking and optimization for conservation[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24 (10): 549-554.

[16] 闫海明，战金艳，张韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展，2012，31（3）：303-314.
YAN Haiming, ZHAN Jinyan, ZHANG Tao. Review of ecosystem resilience research progress[J]. Progress in Geography, 2012, 31 (3): 303-314.

[17] 董安涛，史正涛，苏旺德，等. 南汀河流域生态恢复潜力评价[J]. 生态经济，2015，31（10）：116-120.
DONG Antao, SHI Zhengtao, SU Wangde, et al. The evaluation of the ecological restoration in the watershed of Nanting River Basin[J]. Ecological Economy, 2015, 31 (10): 116-120.

[18] 任海，彭少麟，陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 生态学报，2004，24（8）：1756-1764.
REN Hai, PENG Shaolin, LU Hongfang. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (8): 1756-1764.

[19] 战金艳，闫海明，邓祥征，等. 森林生态系统恢复力评价——以江西省莲花县为例[J]. 自然资源学报，2012，27（8）：1304-1315.
ZHAN Jinyan, YAN Haiming, DENG Xiangzheng, et al. Assessment of forest ecosystem resilience in Lianhua County of Jiangxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27 (8): 1304-1315.

[20] 李丽. 冰雪冻灾干扰下森林生态系统恢复力的定量评价[D]. 西安：西安科技大学，2017.
LI Li. Quantitative assessment of forest ecosystem resilience under disturbed by ice and snow frozen disaster[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.

[21] 闫德洋，王琳，卫宝立，等. 鲁西北农业小镇生态敏感性评价研究[J]. 中国海洋大学学报（自然科学版），2018，48（5）：102-110.
YAN Deyang, WANG Lin, WEI Baoli, et al. Ecological sensitivity evaluation of agricultural town in northwest of Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48 (5): 102-110.

[22] 欧阳志云，王效科，苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报，2000，20（1）：9-12.
OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, MIAO Hong. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20 (1): 9-12.

[23] 曹建军，刘永娟. GIS支持下上海城市生态敏感性分析[J]. 应用生态学报，2010，21（7）：1805-1812.
CAO Jianjun, LIU Yongjuan. Ecological sensitivity of Shanghai City based on GIS spatial analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (7): 1805-1812.

[24] 颜磊，许学工，谢正磊，等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报，2009，29（6）：3117-3125.
YAN Lei, XU Xuegong, XIE Zhenglei, et al. Integrated assessment on ecological sensitivity for Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3117-3125.

[25] 熊善高，秦昌波，于雷，等. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例[J]. 生态学报，2018，38（22）：7899-7911.
XIONG Shangao, QIN Changbo, YU Lei, et al. Methods to identify the boundary of ecological space based on ecosystem service functions and ecological sensitivity: a case study of Nanning City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (22): 7899-7911.

[26] 杨远琴，任平，洪步庭. 基于生态安全格局的三峡库区腹地低丘缓坡土地开发利用[J]. 水土保持研究，2019，26（3）：305-310，317.
YANG Yuanqin, REN Ping, HONG Buting. Development and utilization of gentle-slope hilly land based on ecological security pattern theory of Three Gores Reservoir Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (3): 305-310, 317.

[27] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[DB/OL]. [2019-10-01]. http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=32.
XU Xinliang. Data on the spatial distribution of Chinese population[DB/OL]. [2019-10-01]. http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=32.

[28] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统[EB/OL]. [2019-10-01]. http://www.resdc.cn/DOI, 2017.
XU Xinliang. Data on the spatial distribution of Chinese population .Resource and Environment Data Cloud Platform[EB/OL]. [2019-10-01]. http://www.resdc.cn/DOI, 2017.

[29] 李永格，李宗省，冯起，等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究[J]. 生态学报，2019，39（7）：2343-2352.
LI Yongge, LI Zongxing, FENG Qi. et al. Research on the development of the ecological protection of the Qilian Mountains based on ecological redline[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (7): 2343-2352.

[30] 迟妍妍，许开鹏，王晶晶，等. 京津冀地区生态空间识别研究[J]. 生态学报，2018，38（23）：8555-8563.
CHI Yanyan, XU Kaipeng, WANG Jingjing, et al. Identifying regional ecological space in Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (23): 8555-8563.

[31] 尹海伟，徐建刚，陈昌勇，等. 基于GIS的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. 地理科学，2006，26（1）：64-69.
YIN Haiwei, XU Jiangang, CHEN Changyong, et al. GIS-based ecological sensitivity analysis in the east of Wujiang City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26 (1): 64-69.