

# 基于生态系统服务供需的重庆市主城区生态安全格局构建

## Construction of Ecological Security Pattern in the Metropolitan Area of Chongqing Based on the Supply and Demand of Ecosystem Services

杜文武\* 任超群 张志杰 骆畅  
DU Wenwu\* REN Chaoqun ZHANG Zhijie LUO Chang

(西南大学园艺园林学院, 重庆 400715)  
(School of Horticulture and Garden, Southwest University, Chongqing, China, 400715)

文章编号: 1000-0283(2022)03-0030-09  
DOI: 10.12193/j.laing.2022.03.0030.004  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2021-12-29  
修回日期: 2022-02-09

### 摘要

生态安全格局的构建能够控制城市空间界面的无序化发展, 实现城市绿色发展的可持续化。研究通过对水源涵养、高温调节、固碳释氧、游憩娱乐、食物生产、气体净化6项因子定量评估生态系统服务的供给端和需求端价值, 并根据供需差值划分等级, 结合MSPA确定重要生态源地。采用最小累计阻力模型进行主次生态廊道的提取, 构建出重庆市主城区生态安全格局。结果表明: 识别出重庆市主城区重要生态源地17块, 总面积为148.1 km<sup>2</sup>, 主要分布于巴南区的东南侧山脉和渝北区的北侧山脉; 提取廊道共计48条, 主要廊道和次要廊道各占23条, 两江生态廊道两条, 生态供给节点和需求节点分别为17个和7个; 主次廊道形成了覆盖整个重庆市主城区的绿色生态网络。研究构建的生态安全格局方案可以为重庆市主城区生态安全及区域生态文明建设提供参考, 为后续成渝双城经济圈生态安全战略建设提供理论依据。

### 关键词

生态系统服务; 供需; 生态安全格局; 生态源地; 生态廊道; 重庆市

### Abstract

The construction of water ecological security pattern can control the disorderly development of urban spatial interface and realize the sustainability of urban green development. The study quantitatively evaluates the value of supply side and demand side of ecosystem services through 6 factors: water conservation, high temperature regulation, carbon fixation and oxygen release, recreation and entertainment, food production and gas purification, and it is classified according to the difference between supply and demand and determines important ecological sources in combination with MSPA. The minimum cumulative resistance model is used to extract the primary and secondary ecological corridors, and the ecological security pattern of the main urban area of Chongqing is constructed. The results show that 17 important ecological sources in the main urban area of Chongqing are identified, with a total area of 148.1 km<sup>2</sup>, which are mainly distributed in the southeast mountains of Banan District and the North mountains of Yubei district. There are 48 extraction corridors in total, including 23 main corridors and 23 secondary corridors, 2 Liangjiang ecological corridors, and 17 ecological supply nodes and 7 demand nodes respectively. The main and secondary corridors form an ecological green network covering the whole main urban area of Chongqing. The ecological security pattern scheme constructed in this paper can provide a reference for the regional ecological security and regional ecological civilization construction in the main urban area of Chongqing, and provide a theoretical basis for the follow-up ecological security strategy construction of Chengdu Chongqing double city economic circle.

### Keywords

ecosystem services; supply and demand; ecological security pattern; ecological source; ecological corridor; Chongqing

### 杜文武

1982年生/男/四川泸州人/博士/副教授/  
研究方向为风景园林规划设计与空间治理

### 任超群

1997年生/女/重庆人/在读硕士研究生/  
研究方向为风景园林规划设计与空间治理

### 张志杰

1998年生/男/重庆人/在读硕士研究生/  
研究方向为风景园林规划设计与空间治理

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: duwenwu@swu.edu.cn

基金项目:  
西南大学博士启动基金项目 (编号: SWU119024); 重庆市自然科学基金 (编号: cstc2018jcyjAX0677)

随着社会经济快速发展和城市化进程不断加快,城市空间界面不断蔓延扩张,使得原本的生态用地空间被不断挤压侵蚀,导致大面积的生态用地转为城市建设用地,生态斑块破碎化严重、生物多样性减少、热岛效应、温室效应等一系列城市生态健康问题日益突出<sup>[1-3]</sup>。在此背景下,2021年3月和10月,国务院公布了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》,提出“共筑长江上游生态屏障”“践行绿水青山就是金山银山”理念,坚持“山水林田湖草是一个生命共同体”的全方位、全地域、全过程开展生态文明建设<sup>[4-5]</sup>,体现了国土空间规划体系下对生态文明建设和保证区域生态安全格局稳定性的高度重视。

生态安全格局是指城市的生态安全框架,是由城市的内在生态空间格局所构成,不仅包括局部的生态空间因素,还与周围生态空间相互联结形成生态网络<sup>[6-7]</sup>。从20世纪40年代土地健康理念的提出,许多发达国家开始有意识地利用生态绿地、绿带限制城市的无限扩张并加以管控。由此,关于生态系统健康与环境危险问题成为学者关注焦点和研究热点<sup>[8-10]</sup>。在20世纪90年代,俞孔坚等<sup>[11-14]</sup>引进国外相关研究,利用生态学的思维解读生态安全并提出景观生态安全格局的理论。起初,我国的生态安全理论局限于生态风险,缺乏全局层面的评价和格局研究。随着研究的深入,逐步开展全局生态系统服务评价和完整的生态安全格局构建<sup>[15-16]</sup>。近年来基于生态系统服务进行区域生态安全格局的研究受到格外关注,这种生态安全格局的构建可以考虑到生态系统服务的多个因子并进行综合评估,使得生态安

全格局在空间上具有完整性和在生态系统服务中具有综合性<sup>[15]</sup>。王正伟等<sup>[16]</sup>通过三年的生态系统服务价值综合评定结果确定生态保护的核心“源”区并构建多年生态安全格局,来分析演变趋势。骆畅等<sup>[17]</sup>利用重庆市主城区城市绿色空间多源数据,提取绿色空间信息并利用生态系统服务的量化评价方法评估了城市绿色空间的生态系统服务价值,从而指导生态安全格局的构建。刘维等<sup>[18]</sup>基于2018年遥感数据、统计数据 and 实地调研等多源数据综合评价西安绿色基础设施的生态系统服务供需价值,构建供需模型来识别区域生态安全格局。

目前,构建生态安全格局的理论已经相对成熟,基本遵循“重要源地识别—构建阻力面—廊道的构建”的思路<sup>[19]</sup>。其中,源地是生态安全格局当中生态系统服务最富集的核心区域,能量和物种扩散的源点<sup>[20-21]</sup>。传统的生态源地识别方法,是选择位于城市以外的自然保护地、风景名胜区、水域、森林等区域,由研究者根据经验判断,具有一定主观性<sup>[22]</sup>。生态源地的判断主要通过相关指标构建数字模型以此进行识别,例如生态系统服务价值重要性和敏感性分析<sup>[23-24]</sup>、生态系统服务价值供需关系<sup>[25-26]</sup>、MSPA景观格局分析等<sup>[27-28]</sup>。阻力面是构建廊道的基础,常通过对不同的土地利用类型进行赋值得到,但为了消除直接赋值所带来的主观性,相关研究也利用专家打分法、AHP层次分析法等对多种影响因子附上权重综合生成阻力面<sup>[29]</sup>。廊道是连通源地之间的生态线性通道,能够维持生态安全格局内部连通性和完整性<sup>[21]</sup>。廊道的构建通常采用MCR模型<sup>[16,27]</sup>、引力模型和指标体系等<sup>[30-31]</sup>。

综上,对生态安全格局的研究,应当通过相关指标建立的科学性数字模型对源

地进行识别,利用多重因子赋值形成综合生态阻力面,采用MCR模型和最小成本路径结合运算客观精准地构建廊道。考虑到生态系统服务的供需平衡是维持生态系统稳定和有序发展的关键,是人与自然和谐相处的理想状态<sup>[32]</sup>。同时,通过生态系统服务供需关系的定量评估可以更加精准地评估城市整体的生态安全健康状态,对于城市规划建设具有深刻意义<sup>[17,33]</sup>。本文通过相关生态系统服务因子进行供需关系的量化和评估,结合MSPA识别重要源地,利用MCR模型提取生态廊道构建生态安全格局,以此探索重庆市主城区可持续发展战略,推进成渝双城经济圈的生态发展建设。

## 1 研究区域与研究数据

### 1.1 研究区域概况

重庆市位于西南区域,总占地 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地跨东经 $105^\circ 11'$ — $110^\circ 11'$ ,北纬 $28^\circ 10'$ — $32^\circ 13'$ 。该城市为亚热带季风性湿润气候,年平均气温 $16 \sim 18^\circ\text{C}$ ,平均相对湿度多在 $70\% \sim 80\%$ ,属于高湿地区。同时也是一个典型的山地城市,地势复杂且高差较大,最大海拔高差可达 $2\,700 \text{ m}$ 。重庆市行政区划为26个区、8个县、4个自治县,幅员广阔。其中,主城区包括渝中区、渝北区、南岸区、北碚区、江北区、九龙坡区、沙坪坝区、巴南区、大渡口区9个区,是经济、人流、资源的集中区域(图1)。

据2020年《重庆第七次全国人口普查公报》统计,重庆市主城区常住人口为1 034万人。2020年,重庆市GDP达2.5万亿,主城九区GDP总和近0.6万亿。结合上述数据可得,主城区掌握重庆市核心发展地带,承担人口经济和生态安全发展的双重责任与压力。为更好促进城市可持续发展,避免自然资源的

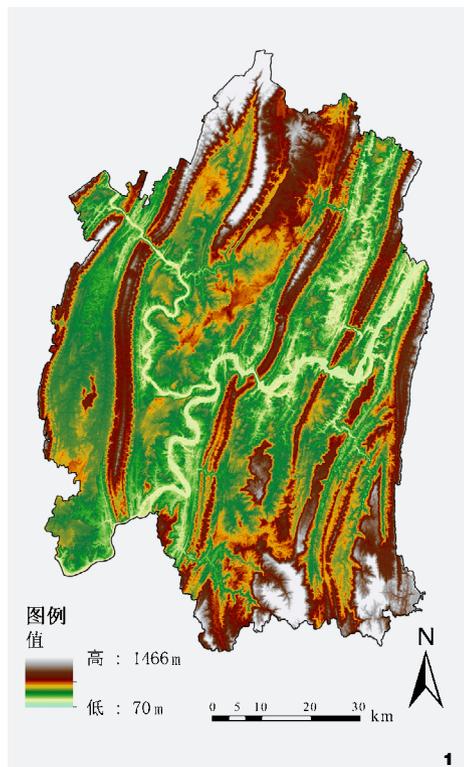


图1 重庆市主城九区高程图  
Fig. 1 Elevation map of nine districts in the main city of Chongqing

损坏和浪费，应重点协调重庆市主城区的发展与其生态安全空间格局。

## 1.2 研究数据及来源

本文所采用的基础研究数据包括：(1) 2019年Landsat 8 OLI\_TIRS影像，空间分辨率为30 m，在ENVI中进行解译提取了林地、草地、耕地、建设用地、水域、裸地6种地类，此外利用ENVI温度反演模块得到夏季地表温度数据，遥感数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)；(2) 30 m精度数字高程模型数据 (DEM数据)，数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)；(3) 2019年中科院版地球夜光数据集 (代号火石)，数据来源火石 (Flint) 数据集 (<http://satsee.radiac.cn/cfimage/highlight/>)；(4) 重庆市主城区矢量边界

数据和道路矢量数据，数据来源于BIGEMAP；(5) 人口经济等数据来源于重庆主城各区统计年鉴；(6) 气体污染物数据来自重庆天气后报 (<http://www.tianqihoubao.com>)。

## 2 研究方法

### 2.1 生态因子的选取确定

由于城市生态系统服务的供需测算并没有相对统一的量化评估方式，部分指标测算仍存在数据获取困难或评估方法不够完善等问题<sup>[22]</sup>。因此，城市生态系统服务需求的测算通常需根据研究的地域、空间尺度、城市特征等综合考量选取对应的指标，相应的关于生态系统服务供需的空间制图手段也不尽相同<sup>[10]</sup>。

本文根据重庆主城九区在快速城镇化发展中所出现的城市下垫面大量硬化、水资源涵养能力减弱、城市热岛效应提升、碳排放量增加、城市酸雨严重、居民游憩绿地分配不均等问题选取出水源涵养、高温调节、固碳释氧、游憩娱乐、食物生产、气体净化6项生态系统服务供需评价因子，以此构建主城九区生态系统服务供需模型<sup>[34-37]</sup>。

### 2.2 生态系统服务供给定量评估

#### 2.2.1 高温调节服务供给测算方法

城市建设导致的下垫面硬化，相对于植物水体具有更高的吸热率和更少的容热率，城市内部温度快速升温的同时林立的高楼建

筑对空气流通产生阻挡，城市内部的热岛效应难以缓解<sup>[10]</sup>。高温调节服务的需求测算可以通过测算植被和水体与城市建成区的地表温度差值，结合对应的人工调节温度的降温费用价值来获得。计算公式 (1) 为：

$$S_{j供} = C \times T \times (T_b - T_j) \times S \quad (1)$$

式中： $S_{j供}$  (单位：元·a<sup>-1</sup>) 代表第j个栅格上高温调节服务的供给价值，表示单位空间人工调节温度的降温费用价值；C采用平均空调降温数据：2.35元/m<sup>2</sup>；T表示年平均降温时间，在这里取一年中最热的6月、7月、8月三月份，每天降温10个小时； $T_b$ 表示城市建筑地表温度； $T_j$ 表示第j个栅格的实际地表温度；S代表单位栅格面积，30 m×30 m=900 m<sup>2</sup>。

#### 2.2.2 固碳释氧服务供给测算方法

现代工业和城市设备需要通过能量消耗进行运转，在能源消耗的同时会产生CO<sub>2</sub>的排放和O<sub>2</sub>的大量消耗。固碳释氧服务的需求测算可以通过不同类型的地类以及水体各自的固碳释氧能力叠加获取。不同地类的固碳释氧情况如表1。

结合相关碳税法 and 氧气的市场价值可以得到固碳释氧服务的计算公式 (2)：

$$C_{j供} = S \times (V_{Cj} \times U_C + V_{Oj} \times U_O) \quad (2)$$

式中： $C_{j供}$  (单位：元·a<sup>-1</sup>) 代表第j个栅格固碳释氧服务的供给价值；S代表单位栅格面积，30 m×30 m=900 m<sup>2</sup>； $V_{Cj}$ 代表第j个

表1 不同地类植被单位面积CO<sub>2</sub>及O<sub>2</sub>释放量  
Tab.1 CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> emissions per unit area of different vegetation types (10<sup>4</sup> kg/hm<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup>)

植被类型 Vegetation type	林地 Woodland	耕地 Cultivated land	草地 Grassland	水体 Water
CO <sub>2</sub> 固定量	1.11	0.50	0.40	0.31
O <sub>2</sub> 释放量	0.81	0.37	0.29	0.22

注：本表数据参考文献[38]整理。

栅格的地类植被所对应的CO<sub>2</sub>固定量； $U_c$ 代表单位质量CO<sub>2</sub>的价值，在这里取丹麦碳税法中的29美元/t； $V_{oj}$ 代表第j个栅格的地类植被所对应的O<sub>2</sub>释放量； $U_o$ 代表单位质量O<sub>2</sub>的价值，根据我国卫生部网站公布的氧气价格取1000元/t。

### 2.2.3 水源涵养服务、游憩娱乐服务等其他供给测算方法

本文水源涵养服务和游憩娱乐服务等其他供给测算参考谢高地等<sup>[39-40]</sup>已有的较为权威的价值评估模型，根据单位面积的土地利用分类所对应的生态系统服务评价模型分别进行计算，得到几种因子对应的生态系统服务供给价值。

## 2.3 生态系统服务需求定量评估

### 2.3.1 水源涵养服务需求测算方法

城镇用水包括居民用水和公共用水组成，水资源的使用使得生态系统中的水源涵养需求日益提升。本文根据重庆主城九区的街道人口空间分布和夜间灯光图所反映的GDP等活力特征综合制图出人口空间密度图，结合全国人均用水量和单位水量水库建造成本综合得出重庆市主城区水源涵养服务需求，计算公式(3)为：

$$W_{j需} = \rho_{jpop} \times V_w \times C \quad (3)$$

式中： $W_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格水源涵养服务的需求价值； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $V_w$ 代表全国人均用水量，在这里根据水利部门颁发的《中国水资源公报》取412 m<sup>3</sup>/人； $C$ 代表单位水量水库建造成本，在这里取0.67元/m<sup>3</sup>。

### 2.3.2 高温调节服务需求测算方法

城市热岛效应的提升导致城市内部温度

大幅提高，过高的温度会影响居民的生活生产活动<sup>[35]</sup>。本文根据重庆市主城九区的夏季遥感温度反演，获取城市地表温度，结合国家所颁布的《防暑降温措施管理方法》所提供的高温补贴标准，每年夏季3个月地表温度大于35℃需要提供不低于45元/月的防暑降温补贴，来测算主城区高温调节服务需求。计算公式(4)为：

$$S_{j需} = \rho_{jpop} \times C \quad (4)$$

式中： $S_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格高温调节服务的需求价值； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $C$ 代表平均每人夏季的高温补贴费用，在这里取45×3=135元/人。

### 2.3.3 固碳释氧服务需求测算方法

城市居民生产生活所产生的CO<sub>2</sub>和消耗的O<sub>2</sub>需要通过生态系统当中的植被和水体中藻类进行固定和释放，从而满足固碳释氧服务需求。本文根据全国人均每年CO<sub>2</sub>排放量以及对应的O<sub>2</sub>消耗量结合人口密度分布图进行固碳释氧服务的需求测算，计算公式(5)为：

$$C_{j需} = \rho_{jpop} \times V_w \times (U_c + \frac{32}{44}U_o) \quad (5)$$

式中： $C_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格固碳释氧服务的需求价值； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $V_w$ 代表全国人均CO<sub>2</sub>排放量，在这里取6.83 t/人； $U_c$ 代表单位质量CO<sub>2</sub>的价值，在这里取丹麦碳税法中的29美元/t（约等于184元/t）； $U_o$ 代表单位质量O<sub>2</sub>的价值，在这里根据我国卫生部网站公布的O<sub>2</sub>价格取1000元/t。

### 2.3.4 游憩娱乐服务需求测算方法

城市居民日常游憩娱乐需求可以通过公园绿地等自然景观来获得，根据中国森林城市所需的人均绿地指标，结合单位面积公园

绿地所能提供的游憩服务价值可以对游憩娱乐服务的需求进行测算，计算公式(6)为：

$$D_{j需} = \rho_{jpop} \times S \times C \quad (6)$$

式中： $D_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格游憩娱乐服务的需求价值； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $S$ 代表森林城市人均绿地指标，在这里取14 m<sup>2</sup>/人； $C$ 代表单位面积公园绿地所能提供的游憩服务价值。

### 2.3.5 食物生产服务需求测算方法

粮食需求由城市居民的食物消耗所组成，通过我国人均粮食消耗量和粮食平均价格可以对食物生产服务需求进行测算，计算公式(7)为：

$$F_{j需} = \rho_{jpop} \times G_w \times C \quad (7)$$

式中： $F_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格食物生产服务的需求价值； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $G_w$ 代表中国人均粮食消耗量，在这里取474 kg/人； $C$ 代表单位重量粮食平均价格，在这里取5元/kg。

### 2.3.6 气体净化服务需求测算方法

城市工业生产、机动车内燃机运转等会产生污染气体对城市空气质量产生影响，通过对城市主要的气体污染物（在这里选择PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>三种污染气体）的处理成本进行计算叠加可以得到气体净化服务需求，计算公式(8)为：

$$A_{j需} = \sum_{i=1}^3 \rho_{ji} \times S \times H \times \rho_{jpop} \times C_i \quad (8)$$

式中： $A_{j需}$ （单位：元·a<sup>-1</sup>）表示第j个栅格气体净化服务的需求价值； $\rho_{ji}$ 表示第j个栅格的第i种污染气体的浓度； $S$ 代表单位栅格面积，30 m×30 m=900 m<sup>2</sup>； $H$ 代表污染气体需要净化的高度，在这里取20 m； $\rho_{jpop}$ 表示第j个栅格的人口密度； $C_i$ 表示第i中气体净化需要的成本。

## 2.4 识别生态源地的方法

生态源地是生态系统能量和物种流通的源地, 提供较高生态系统服务和维持生态系统服务稳定性, 一般集中在较大面积的林地和水域处<sup>[21]</sup>。本文依据《土地利用现状分类》(GB/T 21010-2017) 将遥感数据解译为水域、草地、林地、耕地、建设和未利用地6类用地。首先基于MSPA识别重庆市主城区的生态源地斑块, 同时根据生态系统服务供需空间的供需价值高低进行等级划分, 选取生态系统服务供需正值区的生态用地和具有提升潜力的负值区的生态用地作为重要生态源地选择范围。最终结合斑块的面积大小对源地进行综合排列, 选取出面积大于10 km<sup>2</sup>并且具有较高生态服务价值的斑块作为重要生态源地。

## 2.5 最小累计生态阻力面的构建

生态系统中的能量和物种在流通的时候会受到包括自然因素(地理特征、水文特征等)、人为因素(道路、建筑等)的影响, 不同因素综合作用下会对其流通性产生一定的阻力, 在空间上将各个阻力综合叠加就形成了生态阻力面<sup>[22]</sup>。根据相关研究<sup>[22,26,37]</sup>, 本文根据重庆的地理人文因素选取了土地利用类型、高程、坡度、距离道路距离、距离水体距离5项阻力因子构成生态阻力面, 并且将

各项阻力因子分别划分为5个等级进行赋值制成阻力表(表2)。

## 2.6 廊道的构建

生态廊道是生态源地之间连通载体, 通过对廊道的识别和保护, 能够提高生态系统的完整性和稳定性, 维持生态系统的能量和物种流动的高效性<sup>[21]</sup>。本文利用最小累计阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型和最小成本路径法确定廊道空间。计算公式(9)为:

$$MCR = f_{\min} \sum_{b=n}^{a=m} (M_{ab} \times N_a) \quad (9)$$

式中:  $MCR$ 为最小累积阻力值;  $f$ 表征 $MCR$ 与 $(M_{ab} \times N_a)$ 之间的正函数关系;  $M_{ab}$ 表示从源地 $b$ 到空间某点 $a$ 的距离;  $N_a$ 为空间单元 $a$ 的阻力值。 $MCR$ 越小表明生态流移动受到的阻力越少。

## 3 基于生态系统服务供需评价的重庆市主城区生态安全格局构建

### 3.1 生态系统服务供需空间的识别及特征分析

本文通过ArcGIS、ENVI软件将重庆市主城区九区的水源涵养、高温调节、固碳释氧、游憩娱乐、食物生产、气体净化6项生态系统服务定量评估, 对主城区九区生态空间进行识别以及空间化制图, 得到总体生态系统服务

供给空间格局。计算公式(10)为:

$$V_{j\text{总供}} = W_{j\text{供}} + S_{j\text{供}} + C_{j\text{供}} + D_{j\text{供}} + F_{j\text{供}} + A_{j\text{供}} \quad (10)$$

式中:  $V_{j\text{总供}}$ (单位: 元·a<sup>-1</sup>)表示第 $j$ 个栅格生态系统服务总供给价值;  $W_{j\text{供}}$ 、 $S_{j\text{供}}$ 、 $C_{j\text{供}}$ 、 $D_{j\text{供}}$ 、 $F_{j\text{供}}$ 、 $A_{j\text{供}}$ 分别表示第 $j$ 个栅格水源涵养服务、高温调节服务、固碳释氧服务、游憩娱乐服务、食物生产服务、气体净化服务的供给价值(图2)。

在水源涵养服务供给当中高值区主要分布在横跨主城九区的两条江域、主城东侧以南以及纵跨主城区的几条山脉当中。其中, 两条江域的水源涵养供给价值最高, 其原因是嘉陵江和长江具有抵御洪峰洪流以及大量降雨的水源涵养能力, 同时山脉中的植被草木也能通过发达的根系截留涵养水源。在高温调节服务当中, 高值区分布在山脉林地中植被覆盖度较高的地方, 林地植物的蒸腾作用所带来的高温调节能力明显高于耕地和草地。同理, 在固碳释氧服务和气体净化服务供给当中东侧南北林地分布较广的地区提供的固碳释氧能力和空气净化能力最强, 而城区由于建筑密度较大, 缺乏植被而处于低值区域。在游憩娱乐服务供给中, 高值区仍处于自然景观美感较强的两条江域以及远离城市建设的山脉当中。在食物生产服务供给中可以明显看出高值区位于山脉之间的耕地区域, 这是由于耕地是主要的食物生产地类。

综合6种生态服务供给, 得到主城区生态系统服务总供给, 如图2。重庆市主城区生态系统服务供给的总价值为672亿元, 高值区主要分布在城区以外的东侧南北方向, 具体位于巴南区的明月山脉、桃子荡山脉和东温泉山脉的密集处和位于渝北区的龙王洞山脉及铜锣山脉, 呈现由城市中心向四周不断提高的趋势。由于城市边缘建设强度较

表2 生态用地阻力因子与阻力值  
Tab. 2 Resistance factors and resistance values of ecological land

阻力因子 Resistance factor	阻力值 Resistance value					权重 Weight
	1	2	3	4	5	
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	裸地	建设用地	0.4
高程/m	≤200	(200, 400]	(400, 600]	(600, 800]	>800	0.15
坡度/°	≤3	(3, 8]	(8, 15]	(15, 25]	>25	0.15
距离水体距离/m	≤100	(100, 200]	(200, 300]	(300, 400]	>400	0.15
距离道路距离/m	>400	(300, 400]	(200, 300]	(100, 200]	≤100	0.15

低, 生态破坏较少, 这些区域生态系统稳定, 服务供给能力较强。其中, 水源涵养服务供给价值突出, 占生态系统服务总供给的36.0%, 而生态系统服务供给中的游憩娱乐服务则相对最少, 仅占总服务的5.6%。

6项生态系统服务需求的数据定量评估后得到重庆市主城区的生态系统服务需求格局, 计算公式(11)为:

$$V_{j总需} = W_{j需} + S_{j需} + C_{j需} + D_{j需} + F_{j需} + A_{j需} \quad (11)$$

式中:  $V_{j总需}$  (单位:  $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 表示第j个栅格生态系统服务总需求价值;  $W_{j需}$ 、 $S_{j需}$ 、 $C_{j需}$ 、 $D_{j需}$ 、 $F_{j需}$ 、 $A_{j需}$  分别表示表示第j个栅格水源涵养服务、高温调节服务、固碳释氧服务、游憩娱乐服务、食物生产服务、气体净化服务的需求价值(图3)。

主城区人口分布和GDP分布具有相似的空间分布特征, 以渝中区为中心的周边地块的人口生态系统服务需求更大。城中心50个街道的生态系统服务需求占总需求的82%, 远远超过了周边其他乡镇街道的总和。这是由于城中心经济发展迅速, 人口密度更高。因此, 主城区中心的生态压力较大, 生态系统稳定性较差。

重庆市主城区生态系统服务总需求的价值为537.6亿元, 高值区主要分布在主城区中心, 低值区分布在东南南北郊区方向, 总体呈由主城区向四周逐渐降低的趋势。6项因子中, 固碳释氧需求占比最高, 达47.3%, 而生态系统服务需求中的游憩娱乐服务则相对最少, 只占总服务的1.2%。通过叠加生态系统服务供给图和生态系统服务需求图, 最终可以获得生态系统服务供需空间分布总图, 计算公式(12)为:

$$V_{j供需} = V_{j总供} + V_{j总需} \quad (12)$$

式中:  $V_{j供需}$  (单位:  $\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 表示第j个

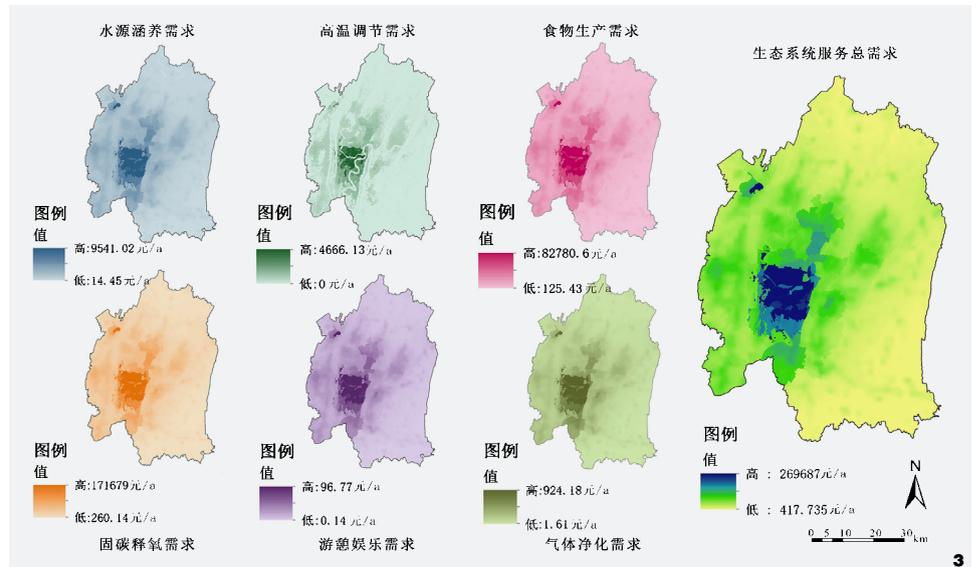
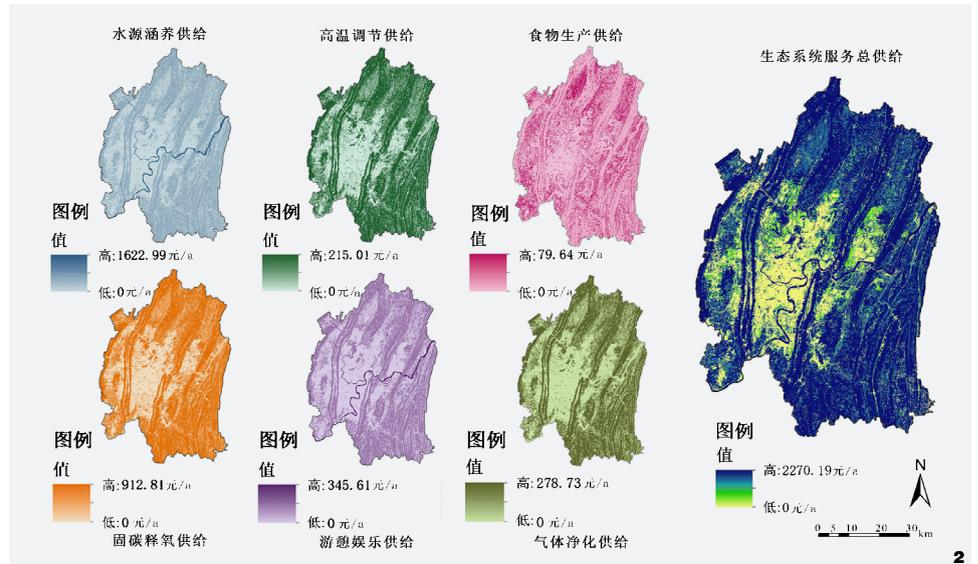


图2 重庆市主城九区生态系统服务供给  
Fig. 2 Ecosystem service supply of nine districts in the main city of Chongqing

图3 重庆市主城九区生态系统服务需求  
Fig. 3 Ecosystem service demand of nine districts in the main city of Chongqing

栅格生态系统服务总供需价值;  $V_{j总供}$  表示第j个栅格生态系统服务总供给价值;  $V_{j总需}$  表示第j个栅格生态系统服务总需求价值。

如图4所示, 重庆市主城九区生态系统服务供需空间呈现严重不匹配状态, 供给无法满足需求, 呈现外部供大于需, 内部供小于需。生态系统供需关系平衡是维持生态系

统稳定性的基础, 因此主城中心内部城区的供需不匹配可以通过生态廊道, 滨江蓝道和城市内部公园的建设将中心城区以外的生态空间效能引进来, 让生态系统服务流由高值区流向低值区, 以此完善整个重庆市主城区的区域生态安全。为进一步提高主城区内部的供给效能, 需对主城九区系统性构建生

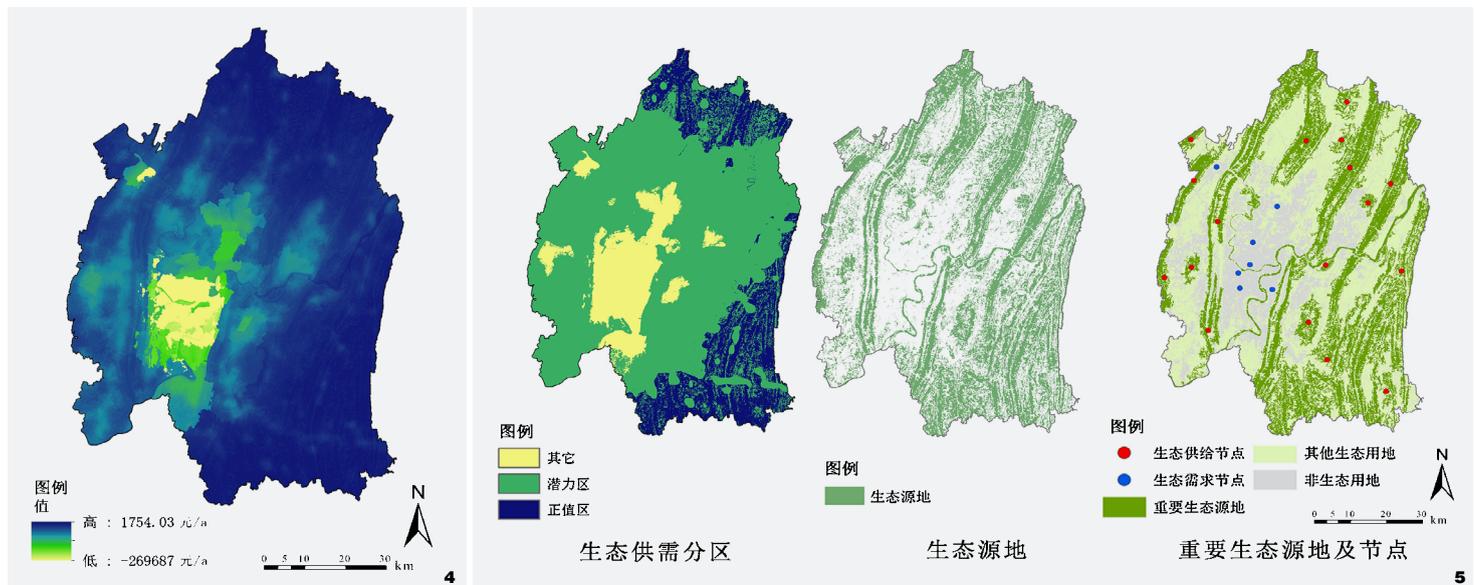


图4 重庆市主城九区生态系统服务供需空间格局  
Fig. 4 Spatial pattern of supply and demand of ecosystem services in nine districts of the main city of Chongqing

图5 重庆市主城九区重要生态源地及节点  
Fig. 5 Important ecological sources and nodes in nine districts of the main city of Chongqing

态安全格局，形成绿色生态网络，从而完善城市的整体生态系统供需关系，达到人与自然和谐相处的目的。

### 3.2 重要生态源地和供需节点的确定

运用MSPA识别重庆市主城区景观要素，结合生态系统服务供需空间格局，选取生态系统服务供需正值区的生态用地和具有提升潜力的负值区的生态用地作为重要生态源地。最终确定17块重要生态源地，总面积达到148.1 km<sup>2</sup>，占研究区总面积的27.1% (图5)。从空间分布上来看，源地主要分布在巴南区的东南侧山脉和渝北区的北侧山脉中，巴南区的源地占总面积的49.1%，渝北区的源地占总面积的30.4%。源地之间被耕地和城市建设用地分隔，因此源地之间的生态连通性较差，空间破碎化较为严重。从土地利用类型来看，源地的地类主要由林地和水域组成，其中林地占源地总面积的83%，水域占源地

总面积的12%。以上数值表明林地和水域的生态价值较高，供给能力较强。

根据识别出的重要生态源地，取其内部中心点作为生态系统服务的17个供给节点。同时为协调平衡供需关系，选取研究区中供需严重不匹配的地块，将生态系统服务流从高值区流向低值区。再根据土地利用类型选取7个需求节点，其中渝北区两个，沙坪坝区、北碚区、江北区、南岸区、九龙坡区各一个。在城市中心城区需求旺盛地块中将具有较好生态系统服务供给能力的大型绿地作为生态系统服务需求节点。需求节点皆位于生态本底较好的类似中央公园、园博园的大型绿块。

### 3.3 生态阻力面和廊道的构建

根据表2加权叠加得到综合生态阻力面 (图6)。生态阻力面中高值区主要分布在城市中心，这是由于城市中心建设活动强烈，生态空间破坏比较明显。而城市中心以外的生

态空间大部分阻力较低，生态系统完整性较强，人为干预较少。

生态廊道是联系生态源地的通道，起到源地之间能量和物种的交换作用，对于维持生态系统连通性和完整性具有重要作用。通过ArcGIS10.6平台，运用最小累计阻力模型，以17个供给节点和7个需求节点作为起始点，将剩余的节点作为目标节点，计算最小耗费路径，得出生态源地之间的生态廊道。在计算结果基础上删减掉一些重要性较低并较为细碎的廊道，根据土地利用和生态空间分类等实际条件调整某些廊道线型。同时，一般会认为长江、嘉陵江是重庆重要的生态廊道，于是将长江和嘉陵江流线增设为重要的生态廊道。最后得出重庆市主城区的生态廊道总共48条，其中主要廊道和次要廊道各占23条，两江生态廊道两条 (图7)。主要廊道是将城区四周的重要生态源地的生态系统服务价值向城市中心汇集而形成的通道，是搭

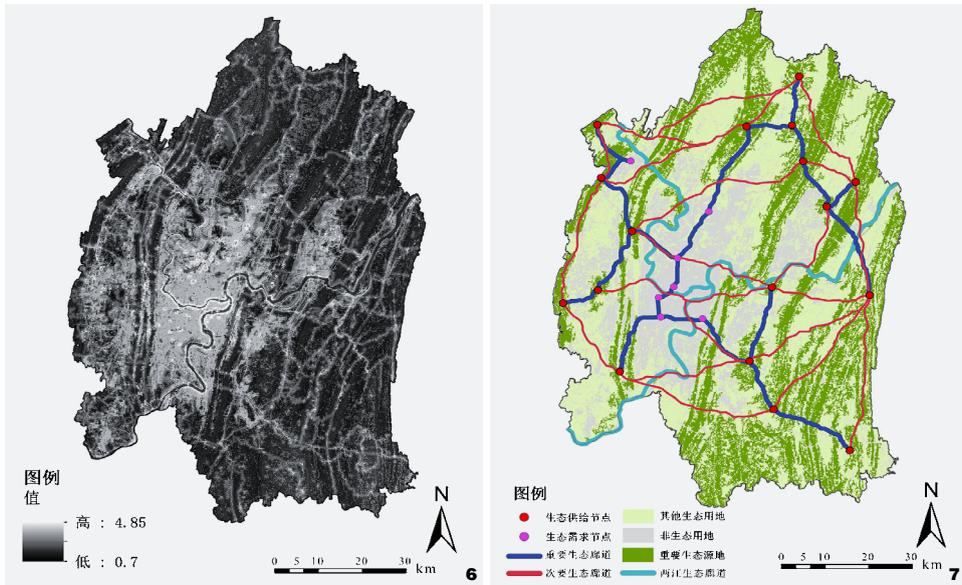


图6 重庆市主城九区生态阻力面  
Fig. 6 Ecological resistance surface of nine districts in the main city of Chongqing

图7 重庆市主城九区生态安全格局  
Fig. 7 Ecological security pattern of nine districts in the main city of Chongqing

接城市中心生态系统服务需求和源地生态系统服务供给的桥梁。总体呈现由中心向四周扩散的“工”字型，总长度为296.1 km。其中向东北方向延伸的支脉最长，达到111.9 km，占总长度的37.8%，纵跨整个渝北区连接北部的龙王洞山脉，往东边延展至铜锣山脉后急转向东南联结到明月山脉和东温泉山脉。向西南方向的支脉最短，仅占总长度的6.0%，由九龙坡需求节点向西彭镇延伸。23条次要廊道是完善城市生态系统网络的辅助通道，将17块重要源地相互连接，与主要廊道相互形成重庆市主城区的绿色生态网络，提高生态系统的稳定性，完善生态系统安全格局。两江生态廊道是以长江和嘉陵江流线而形成的生态廊道，是重庆市水资源和水生动植物重要的栖息地及流通场所。

#### 4 结论与讨论

本文创新点在于与传统的生态安全格局

构建相比，生态系统服务供需是在生态安全格局构建过程中考虑，通过构建生态安全格局将外围生态系统服务高值区的能量与物种流向城市中心生态系统服务需求高值区，从而达到城市内外的供需关系匹配。以往生态廊道构建通常避开城市建设发展较快的区域，仅将其他重要的生态空间相互连接。而本文并没有忽略中心城区内部存在的生态系统服务供给能力缺乏和城市居民对生态系统服务需求旺盛的矛盾，在城市中心城区需求旺盛地块中将具有较好生态系统服务供给能力的大型绿地作为生态系统服务需求节点，以此连接生态系统服务高值区，形成城市外围向城市内部能量物种输送的目的。

最终研究表明：(1) 重庆市主城区生态系统服务供给、需求总价值分别为672亿元、5376亿元，空间分布趋势互为反向。这表明生态系统服务供需空间存在明显的空间异质性，城市中心生态系统服务供需关系

失衡，生态系统稳定性较差，很大原因可能是城区人口密度过高。建议保护和巩固城市中心区域绿地和水域等生态空间，提升原有生态空间生态服务供给能力；同时兴建城市公园，满足居民游憩娱乐功能，并进一步提高城市内部生态系统稳定性。

(2) 重庆市主城区生态源地总面积为148.1 km<sup>2</sup>，主要位于巴南区的东南侧山脉和渝北区的北侧山脉中，顺应山脉呈纵向条状排列。整体空间格局分布不均，破碎化程度较高，与城市中心的连通性较差。原因是城市中心建设强度较大挤压了生态空间，源地与源地间的生态空间消失，形成了相对独立的山脉源地。对此建议划定生态保育区域，确保生态源地不被城市建设侵占，同时适当退耕还林保证源地内部完整性。

(3) 重庆市主城区提取出生态廊道48条，其中主要廊道和次要廊道各23条，两江生态廊道两条，生态供给节点和需求节点分别为17个和7个。主要廊道呈现“工”字型分布，将各个源地与城市高需求地区连接。次要廊道将重要生态源地相互连接，并结合主要廊道形成覆盖整个重庆市主城区的绿色生态网络。为增强生态廊道的流通功能，建议在廊道沿线减弱生产生活活动，避免对廊道生态空间的挤压，同时适当扩宽廊道宽度并布置绿色基础设施作为小型生态节点，从而加强生态源地之间的连通性和郊区区域向中心区域的生态系统服务供给能力。

本文在结合前人的研究上，以生态系统服务供需评价为基础来构建重庆市主城区生态安全格局，以实现解决生产生活水平快速发展所导致的生态安全破坏问题，达到人与自然和谐相处的可持续发展状态。但仍存在以下不足，需要在后续研究中继续深化解决：

(1) 由于数据获取和数据精度的限制，

仅选取6项典型的生态系统服务来定量评估重庆市主城九区的生态系统服务供需情况,因此存在其他服务方面的考虑不足。

(2) 试图通过生态系统服务流的理论,将生态系统服务的能量和物种由高值区向低值区流动,但是相关点位选取的研究不够充分,具有一定主观性。

(3) 在构建生态安全格局时,虽然在源地的选取和供需节点的确定上进行了人为的优化,但是主要是由软件运算所得到的生态安全格局,因此方案的可操作性可能还有所欠缺。 

#### 参考文献

- [1] SU S, RUI X, JIANG Z, et al. Characterizing Landscape Pattern and Ecosystem Service Value Changes for Urbanization Impacts at an Eco-regional Scale[J]. *Applied Geography*, 2012, 34(1): 295-305.
- [2] HAAS J, BAN Y. Urban Growth and Environmental Impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 30(1): 42-55.
- [3] 王云才, 申佳可, 彭震伟, 等. 适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化[J]. *中国园林*, 2018, 34(10): 45-49.
- [4] 中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-3-13)[2021-11-15]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [5] 中共中央, 国务院. 成渝地区双城经济圈建设规划纲要[EB/OL]. (2021-10-21)[2021-11-15]. [http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content\\_5643875.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/21/content_5643875.htm).
- [6] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 等. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J]. *地理研究*, 2017, 36(03): 441-452.
- [7] 王云才, 吕东, 彭震伟, 等. 基于生态网络规划的生态红线划定研究——以安徽省宣城市南漪湖地区为例[J]. *城市规划学刊*, 2015(03): 28-35.
- [8] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [9] 李功, 刘家明, 宋涛, 等. 北京市绿带游憩空间分布特征及其成因[J]. *地理研究*, 2015, 34(08): 1507-1521.
- [10] TANG X, LIU Y, PAN Y. An Evaluation and Region Division Method for Ecosystem Service Supply and Demand Based on Land Use and POI Data[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2524.
- [11] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999(01): 10-17.
- [12] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. *生态学报*, 2009, 29(03): 1189-1204.
- [13] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999(05): 19-25.
- [14] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. *应用生态学报*, 2000(04): 481-484.
- [15] 郝亮. 基于生态系统服务供需关系的上海市生态安全格局分析[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [16] 王正伟, 王宏卫, 杨胜天, 等. 基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略——以拜城县为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(01): 91-104.
- [17] 骆畅, 李相逸, 李滨钰. 基于生态系统服务价值评估的山地城市绿色空间规划策略——以重庆市主城区为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(05): 195-204.
- [18] 刘维, 周忠学, 郎睿婷. 城市绿色基础设施生态系统服务供需关系及空间优化——以西安市为例[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(05): 1500-1513.
- [19] JIANG C, ZHANG H Y, ZHANG Z D. Spatially Explicit Assessment of Ecosystem Services in China's Loess Plateau: Patterns, Interactions, Drivers, and Implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 161: 41-52.
- [20] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. *地理研究*, 2016, 35(06): 1005-1016.
- [21] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(01): 250-258.
- [22] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(07): 1052-1061.
- [23] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例[J]. *地理研究*, 2017, 36(03): 429-440.
- [24] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(09): 5-11.
- [25] HESS G R, FISCHER R A. Communicating Clearly About Conservation Corridors[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 55(3): 195-208.
- [26] 张慧, 邱凯玉, 王宇瑶, 等. 农业主产区土地生态安全格局构建——以克东县为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(06): 274-282.
- [27] WU X, LIU S L, ZHAO S, et al. Quantification and Driving Force Analysis of Ecosystem Services Supply, Demand and Balance in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [28] 李柳意, 郑曦. 生态系统供需视角下石家庄蓝绿空间规划研究[C]//面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集(08城市生态规划), 2021: 577-586.
- [29] YE H, YANG Z P, XU X L. Ecological Corridors Analysis Based on MSPA and MCR Model—A Case Study of the Tomur World Natural Heritage Region[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 959.
- [30] 史瑶. 基于MSPA和MCR模型的资兴市生态网络构建研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [31] 孙枫, 章锦河, 王培家, 等. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例[J]. *地理研究*, 2021, 40(09): 2476-2493.
- [32] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. *生态学报*, 2008(04): 1711-1719.
- [33] 吴健生, 罗可雨, 马洪坤, 等. 基于生态系统服务与引力模型的珠三角生态安全与修复格局研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8417-8429.
- [34] BELLO F D, LAVOREL S, DIAZ S, et al. Towards an Assessment of Multiple Ecosystem Processes and Services via Functional Traits[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2873-2893.
- [35] 邱坚坚, 刘毅华, 袁利, 等. 人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(06): 1060-1072.
- [36] SU S L, LI D L, HU Y N, et al. Spatially Non-stationary Response of Ecosystem Service Value Changes to Urbanization in Shanghai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 332-339.
- [37] WU A B, ZHAO Y X, SHEN H T, et al. Spatio-temporal Pattern Evolution of Ecosystem Service Supply and Demand in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(11): 968-975.
- [38] 吴晓. 绿色基础设施生态系统服务供需及景观格局优化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [39] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003(02): 189-196.
- [40] 余萍. GIS支持下的重庆市生态系统服务评价研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.