

郎爱芳, 李木子, 陶亮. 基于多智能体粒子群算法的城乡空间规划方法[J]. 华南地震, 2025, 45(1): 145-151. [LANG Aifang, LI Muzi, TAO Liang. Urban and Rural Spatial Planning Method Based on Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. South China journal of seismology, 2025, 45(1): 145-151]

基于多智能体粒子群算法的城乡空间规划方法

郎爱芳, 李木子, 陶亮

(中铁十四局集团山东省人民防空建筑设计院有限责任公司, 济南 250000)

摘要: 由于不同地类的空间分布特征和形状具有较高的复杂性, 导致难以确定三级空间类型对整体空间布局的重要性程度, 从而使得规划后的空间利用率较低。为此, 提出基于多智能体粒子群算法的城乡空间规划方法。基于城乡“三生”空间分类原理, 确定空间利用的功能分区, 并基于“三生”空间的转移特征和三级空间类型的比重变化, 计算三级地类对空间规划的重要性, 由此确定城乡空间利用的形态分维数, 结合城乡空间规划要求, 设立以生态安全最高、空间规划费用最小和空间协调度最大为目标的函数, 并综合相应约束条件构建空间规划模型, 引入多智能体粒子群算法求解模型, 进而输出城乡空间规划策略。实验结果表明, 利用所提方法对研究区域进行空间规划后, 空地率最低值仅为0.08%, 研究区域的空间格局得到了有效利用, 空间利用率显著提升, 说明其规划性能较为优异。

关键词: 多智能体粒子群算法; 三生空间; 城乡; 空间规划; 空间利用率

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)01-0145-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.01.18

Urban and Rural Spatial Planning Method Based on Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm

LANG Aifang, LI Muzi, TAO Liang

(China Railway 14th Bureau Group Shandong Civil Air Defense Architectural

Design Institute Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: Due to the high complexity of the spatial distribution characteristics and shapes of different land types, it is difficult to determine the importance of the three-level spatial types for the overall spatial layout, resulting in a lower utilization rate of the planned space. To this end, a method for urban and rural spatial planning based on a multi-agent particle swarm optimization algorithm was proposed. According to the classification principle of urban and rural production space, living space, and ecological space, the functional zoning of spatial utilization was determined. Based on the transfer characteristics of the production-living-ecological space and the changes in the proportion of the three-level spatial types, the importance of the three-level land type to spatial planning was calculated. The fractal dimension of the form of urban and rural spatial utilization was determined. By referring to the requirements of urban and rural spatial planning, a function with the highest ecological security, the minimum spatial planning cost, and the maximum spatial coordination degree was established. A spatial planning model was

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 乡村振兴下的村庄规划设计理念研究(913700001630559891202230)

作者简介: 郎爱芳(1976-), 女, 正高级工程师, 研究方向为城乡规划及建筑设计。

E-mail: limuzi_2024@163.com

constructed by integrating corresponding constraint conditions, and a multi-agent particle swarm optimization algorithm was introduced to solve the model. Then, the urban and rural spatial planning strategy was output. The experimental results show that after using the proposed method for spatial planning of the study area, the minimum open space ratio is only 0.08%. The spatial pattern of the study area has been effectively utilized, and the spatial utilization rate has significantly improved, indicating excellent planning performance.

Keywords: Multi-agent particle swarm optimization algorithm; Production-living-ecological space; Urban and rural area; Spatial planning; Spatial utilization rate

0 引言

城乡空间规划作为现代城镇化不可或缺的组成部分,旨在科学合理地配置城乡空间资源,然而,随着城市化进程的加快,城乡空间规划面临着土地资源稀缺、交通拥堵等诸多挑战。传统的城乡空间规划方法往往侧重于单一目标的优化,缺乏对多个目标和因素的综合考虑。此外,传统方法往往忽视了生态环境保护 and 可持续发展的重要性,导致规划结果与实际需求脱节,难以达到预期效果。因此,研究新的城乡空间规划方法具有重要的现实意义和理论价值。

当前城乡空间规划主要聚焦于GIS分析、遥感技术、空间模拟等多种技术的综合应用,GIS技术凭借其强大的数据处理和空间分析能力,在城乡规划领域得到了广泛应用,如城市基础设施规划、土地利用分析等方面。遥感技术则通过获取城市地表信息,为城市规划提供重要的数据支持,尤其在城市地形分析、绿化覆盖率监测等方面发挥重要作用。此外,空间模拟方法也被广泛采用,用于预测和评估不同规划方案的效果^[1-3]。然而,当前研究仍存在不足,如技术应用仍面临数据质量和完整性的挑战,缺乏综合性分析以平衡不同利益群体需求,以及规划执行与评估机制的不完善,这些问题亟待进一步的研究和探索。为了进一步改善城乡空间规划效果,文献[4]通过收集、组织和分析各项经济指标,并确定各项指标在综合经济指标中的权重,采用统计方法对各指标进行加权求和,得出综合经济指标的具体值,结合横向和纵向比较和分析不同地区的经济发展状况,以确定空间规划的重点和方向,由此实现空间规划。但是确定各项指标在综合经济指标中的权重往往涉及主观判断,可能受到决策者偏好、经验或利益的影响,导致权重设置不够客观和准确,影响空间规划效果。文献[5]基于空间资源的特征、需求和规划目标与相关数据,确

定每个空间区域的属性或特征值,并将这些特征值与设置的阈值进行比较,以将空间区域划分为不同的类别,之后为不同类别的空间区域制定具体的规划措施和战略。这种方法的优点是可以确保每个空间区域都被清晰地分配和定位,有助于实现空间资源的精确分配。但数据的获取和处理可能存在质量问题,会影响特征值的计算和区域划分的准确性,从而导致规划结果不理想。文献[6]对地形、气候、植被、水资源、社会经济等方面的信息数据进行深度处理和分析,在此基础上,结合规划目标和约束条件,构建空间规划模型,并通过优化算法获得了最优空间布局方案。该方法具有良好的适应性和灵活性,可以根据不同地区的实际情况进行调整和优化。但是该方法主要基于静态数据和模型进行优化,可能无法充分考虑到未来经济发展、社会变化、环境变化等带来的动态性和不确定性,这可能导致规划方案在未来实施中面临挑战和困难,易导致空间利用率较低。文献[7]依靠激光投影技术,将规划的设计方案投影到实际空间中,并基于收集的数据和规划目标构建初始空间布局规划模式,利用优化算法对模型进行迭代优化,直到获得满意的规划结果。该方法可以实现高精度、高清晰度的空间投影,使规划设计方案能够在实际空间中真实直观地呈现,便于评估和修改。优化算法虽然可以改进规划模型,但其效果取决于算法的选择和参数的设置,如果算法选择不当或参数设置不合理,可能会导致规划结果的不理想或无法满足特定需求。

通过对现有规划方法的梳理和分析,为提高城乡空间规划后的空间利用率,本文提出一种基于多智能体粒子群算法的城乡空间规划方法,结合“三生”空间分类原理,通过计算三级地类对空间规划的重要性来确定空间利用的形态分维数,并设立生态安全、规划费用和空间协调度为优化目标,构建了具有生态导向的空间规划模型,利用多智能体粒子群算法求解,实现了城乡空间的高效、协调和可持续规划。

1 城乡空间规划方法设计

1.1 城乡空间利用形态分维计算

形态分维是对城乡利用空间结构进行量化分析的一种手段,有助于深入理解城乡空间格局的复杂性和多样性。根据城乡空间类型,通过计算和分析空间利用形态的分形维数,可以了解不同地类的空间分布特征、形状的复杂性和空间结构的演变^[8]。“三生”用地分类的主要目的在于为城乡空间规划

提供科学依据,促进城乡空间的合理布局和协调发展。通过明确各类土地的功能定位和利用方式,更好地实现土地资源的优化配置和高效利用。“三生”用地分类依据土地利用的主要功能和目的,将城乡空间划分为三大类别:生产空间、生活空间和生态空间。这种分类方法旨在全面考虑人类活动对土地资源的利用方式,以及土地资源对人类社会和自然环境的支撑作用。

当前城乡空间格局主要为“三生”分类,其中,以生产空间、生活空间和生态空间为一级地类^[9],并进一步细分为二级地类,具体如下表1所示。

表1 城乡“三生”空间分类

Table 1 Classification of "production-living-ecological" space in urban and rural areas

一级地类	二级地类	城乡差异说明
生产空间	工业生产用地	城镇中常集中布局于工业园区,乡村则可能分散或小型化布局
	农业生产用地	乡村的主要用地类型,城镇周边可能存在少量用于都市农业的用地
	服务业用地(非居住)	城镇中广泛存在,包括商业、金融、物流等服务业用地;乡村相对较少
	交通运输用地	城乡均有,但城镇的交通运输用地更加密集和复杂
生活空间	居住用地	城镇中多为高层住宅、公寓等;乡村则多为低层住宅、宅基地等
	公共服务设施用地	包括学校、医院、公园等,城乡均有,但城镇的服务设施更加完善和集中
	商业服务设施用地	城镇中占据重要地位,乡村则相对较少,但近年来乡村旅游兴起,商业服务设施有所增加
生态空间	林地、草地、湿地等自然区域	城乡均有,但乡村通常保留更多自然生态空间,城镇则多为城市绿地、公园等
	生态保护红线区域	为保护生态环境而划定的特定区域,城乡均可能设置,但乡村可能更多保留原有生态
	风景名胜区、自然保护区	多位于自然环境优美或生态敏感区域,城乡均可能设置,但管理方式和目的有所不同

根据城乡“三生”空间的转移特征,可以确定不同空间类型的比重变化,并通过对三级地类进行编码,可计算第*i*个三级空间类型对整体空间布局的重要性,公式为:

$$p_i = \sum_{k=1}^n \frac{f_0}{u_1} \times V_k \quad (1)$$

式(1)中,*n*三级地类数量,本文取*n* = 21; *f*₀表示空间地类的最小累积阻力值; *u*₁表示调整参数; *V*_{*k*}表示决策变量。

将三级地类对空间规划的重要性程度进行分级,结合各斑块之间的相互作用力求取斑块面积^[10],即:

$$A_j = p_i \left[\frac{q_j(1 - h_0)}{\sqrt{\alpha_s}} \right] \quad (2)$$

式(2)中, *q*_{*j*}表示第*j*个斑块的综合容积率; *h*₀表示综合建筑密度; *α*_{*s*}表示三级地类占总评价单元的

比例。

进而可以斑块周长确定城乡空间利用的形态分维数,计算公式如下:

$$w_s = \frac{A_j \times k_p}{\|d_0 \times j_p\|^2} \quad (3)$$

式(3)中, *k*_{*p*}表示斑块周长; *d*₀表示常数,与具体斑块或区域特性有关; *j*_{*p*}表示计算矩阵。

基于城乡“三生”空间分类原理,计算三级地类对空间规划的整体重要性,结合空间斑块面积确定城乡空间利用的形态分维数,为接下来建立城乡空间规划模型提供有利条件。

1.2 建立城乡空间规划模型

为实现城乡区域的空间结构、功能布局、资源环境等因素的具体化和量化表达,本文设立生态安全最高、空间规划费用最小和空间协调度最大3个

目标,在研究区域利用空间格局变化最优时空尺度下建立城乡空间规划模型。在多数研究区域,生态环境问题已经成为制约其可持续发展的重要因素。因此,将生态安全作为规划的首要目标,符合研究区的实际发展状况,有利于推动研究区生态环境的改善和可持续发展。保护生态环境、维护生态安全是城乡空间规划的首要任务。通过设立生态安全最高这一目标,可以确保在规划过程中充分考虑生态环境的因素,避免或减少对生态系统的破坏,实现人与自然的和谐共生;在资源有限的情况下,研究区需要充分利用现有资源,实现规划效益的最大化。因此,将空间规划费用最小作为规划目标之一,符合研究区的实际发展状况,有利于推动研究区城乡空间规划的高效实施。通过设立空间规划费用最小这一目标,可以在规划过程中优化资源配置,提高规划效率,降低规划成本。这有利于推动城乡空间规划的可持续发展,提高规划的社会效益和经济效益;在城乡发展不平衡的背景下,研究区需要加强城乡之间的联系和互动,实现城乡之间的协调发展。因此,将空间协调度最大作为规划目标之一,符合研究区的实际发展状况,有利于推动研究区城乡空间规划的协调发展。空间协调度是衡量城乡空间规划效果的重要指标之一,通过设立空间协调度最大这一目标,可以在规划过程中注重城乡之间的空间联系和功能互补,促进城乡之间的协调发展。

城乡空间规划不仅关注土地利用、城市发展和基础设施建设等方面,还需充分考虑生态系统的健康和完整性^[11]。因此,在城乡空间规划中,需要充分考虑生态系统的保护和恢复,确保城乡发展与生态安全之间的平衡。生态安全目标函数可表示为:

$$\max g_1 = \sum_{h=1}^H f_h w_s \quad (4)$$

式(4)中, H 表示各地类 h 表示面积; f_h 表示生产型土地面积; w_s 表示空间利用的形态分维数; g_1 表示区域生态承载力。

政府和企业在进行城乡空间规划时,需要充分考虑各种成本因素,以确保规划策略在经济上可行和高效^[12]。空间规划成本目标函数可表示为:

$$\min g_2 = w_s (c_1 + c_2 + c_3) \quad (5)$$

式(5)中, c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示土地成本、建设成本、运营成本。

空间协调度可以确保空间中各种规划要素的

协调和统一,从而促进城乡经济的协调发展^[13]。空间规划协调度目标函数可表示为:

$$\max g_3 = \sum_{l=1}^L \sum_{x=1}^X w_s M_{lx} \quad (6)$$

式(6)中, L 表示空间单元个数; X 表示与目标单元相邻的空间单元个数; M_{lx} 表示第 l 个空间单元与第 x 个空间单元的协调度。

对上述各目标函数设计约束条件,表达式为:

$$\begin{cases} y_{pq} = 1 \\ b_s \geq 2 \\ s' = s \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, y_{pq} 表示每个利用空间单元 (p,q) 上只存在一种利用类型,为基本栅格约束^[14]; b_s 表示邻域内建设单元用地不得小于2,为空间紧凑性约束; s' 、 s 分别表示规划后和规划前的空间总面积,为空间布局约束^[15]。

将约束条件与目标函数进行叠加拟合,构建城乡空间规划模型,即:

$$G = \beta_1 g_1 - \beta_2 g_2 + \beta_3 g_3 \quad (8)$$

式(8)中, β_1 、 β_2 、 β_3 分别表示各目标函数对应的权重; G 表示空间规划模型。

进一步采用优化算法求解模型,从而得到全局最优解,输出空间规划策略。

1.3 基于多智能体粒子群算法的模型求解

由于上述建立的空间规划模型是一个复杂的问题,常用的方法求解得到的结果一般为局部最优解,无法满足约束条件。因此,本文采用多智能体粒子群算法对模型求解,通过多智能体系统中,各智能体之间将自身状态信息进行交互,同时在粒子群优化算法下,每个粒子找到最优适应度来实现优化目标^[16]。其实现流程如图1所示。

利用多智能体系统构建 $a \times a$ 的网格结构,网格的总数与空间单元和粒子数目相等。且每个空间单元对应一个智能体^[17],则粒子的初始适应度值为:

$$f_m = a \times j_p \times \alpha_n \quad (9)$$

式(9)中, j_p 表示智能体坐标; α_n 表示离散系数。

通过多智能体的自学习机制对粒子的位置和速度进行更新,由此得到具有最佳位置和速度的粒子的适应度值^[18],即:

$$f'_m = z_s \times f_m / v_m \quad (10)$$

式(10)中, z_s 表示变量维数; v_m 表示映射系数。

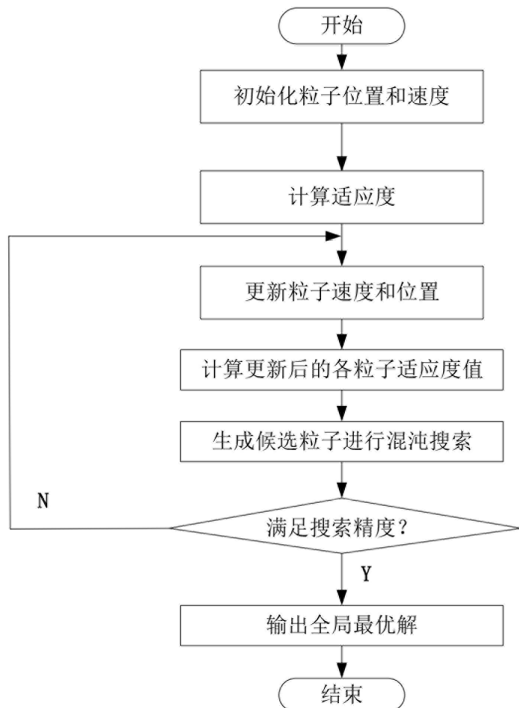


图1 基于多智能体粒子群算法的空间规划模型求解流程
Fig.1 Solution flow of spatial planning model based on multi-agent particle swarm optimization algorithm

结合多智能体的遍历性与随机性,在局部最优解周围生成候选粒子,并进行混沌搜索,进而得到全局最佳适应度值,公式为:

$$F = f'_m \times n_b \times c_i \quad (11)$$

式(11)中, n_b 表示第 b 个混沌变量; c_i 表示当前迭代次数。

当此时算法的搜索精度与预设值 ε 一致,则输出全局最优解,得到空间规划策略;否则更新粒子位置与速度,继续运算,由此实现城乡空间规划。

2 实例论证分析

2.1 研究背景

本文以A城乡区域为研究对象。该城乡在空间利用方面存在显著差异和特点。在城市地区,土地利用结构相对多样化,商业用地占28%;居住用地比例最高,达到42%;工业用地占比约为12%。相比之下,农村地区的空间利用主要集中在农业上,农业用地占比高达75%,其中耕地占绝大多数;此外,森林和草原也占一定比例。研究区域的空间结构示意图如图2所示。



图2 研究区域的空间结构示意图

Fig.2 Spatial structure of the study area

该区域城市人口密度较高,农村区域的人口密度则相对较低,约为每平方公里200人。在经济发展方面,城市地区明显领先于农村地区。根据过去五年的统计数据,城市地区的GDP增长率已连续几年保持在7%以上,显示出强劲的经济增长势头。相对而言,尽管农村地区的GDP增长率也在稳步上升,但增长率相对较低,平均在5%左右。该城乡区域在空间利用、人口分布和经济发展方面均表现出较大的差异。为了实现城乡协调发展,应进一步加强空间规划和管理。

2.2 实验准备

该实验在模拟的城乡环境中进行,其中包括城市和农村的各种要素,如土地利用、交通网络等。通过计算机模拟灵活调整各种参数,以测试规划方案的有效性。实验平台包括ArcGIS和Python。ArcGIS提供强大的空间数据处理和分析能力;Python支持多智能体粒子群优化算法的实现以及与其他软件的集成。

设置粒子群大小为50,迭代次数为100,惯性权重为0.8,学习因子 c_1 和 c_2 分别为2和4,以将粒子学习的权重调整为局部和全局最优位置。

通过以上实验准备,可以对基于多智能体粒子群优化算法的城乡空间规划方法进行仿真研究,以找到最优规划方案,为实际的城乡空间布局提供科学依据和参考。

2.3 城乡空间规划结果与分析

基于以上实验准备与相关参数的设置,将本文设计的方法应用于图2所示的城乡空间规划中,并

引入文献[4]方法(方法1)、文献[5]方法(方法2)作为本文方法的对比方法。分别采用3种方法对该研究区域进行空间规划,比较基于不同方法优化前后的各类型空间分布面积,实验结果如表2所示。

表2 城乡空间规划结果

Table 2 Results of urban and rural spatial planning

空间类型	规划前分布面积/km ²	规划后分布面积/km ²		
		方法1	方法2	本文方法
生产空间	281.97	290.36	265.29	533.38
生活空间	168.08	150.23	166.07	406.42
生态空间	1406.86	1445.20	1589.26	1733.96

由上表中的数据可知,应用本文方法对该区域进行空间规划,与规划前相比,规划后的生产空间、生活空间和生态空间的分布面积均有所增加。而方法1受到不同因素的影响,权重设置不够客观和准确,影响其规划效果,导致其在规划生产空间方面有一定效果,但在生活空间规划上表现不佳;方法2不能实现对数据的有效处理,影响区域划分的准确性,导致其在生态空间规划上表现出色,但在生产空间和生活空间的规划上效果有限。这表明方法2在平衡不同空间类型的需求方面存在不足。由此可以说明,经过本文方法规划后,既扩大了研究区的生产空间和生活空间,又优化了生态空间布局,显示出其在城乡空间规划方面的优越性和综合性,证明该方法能够提高城乡的空间利用率。这是因为本文方法能够综合考虑不同地类空间分布和形状的复杂性,通过精确计算三级地类对空间规划的重要性并确定形态分维数,从而实现了空间布局的高效利用。

2.4 对比实验分析

为进一步证明本文方法在城乡空间规划方面的可行性,保持算法参数的一致性,采用3种方法对区域进行空间规划,并计算各种方法规划后区域的空地率。空地率越低,表明区域内闲置的土地面积越小,空间利用率越高。对比结果如图3所示。

分析图3中的数据可知,与其他两种方法相比,采用本文方法进行空间规划后,得到的研究区空地率最低,其最高值为0.3%,最低值为0.08%,而方法1和方法2的空地率的最低值分别为0.42%和0.29%,明显高于本文方法,说明应用本文方法之后研究区域的空间格局得到了有效利用,空间利

用率较高,进而说明了本文方法在城乡空间规划中的可行性。

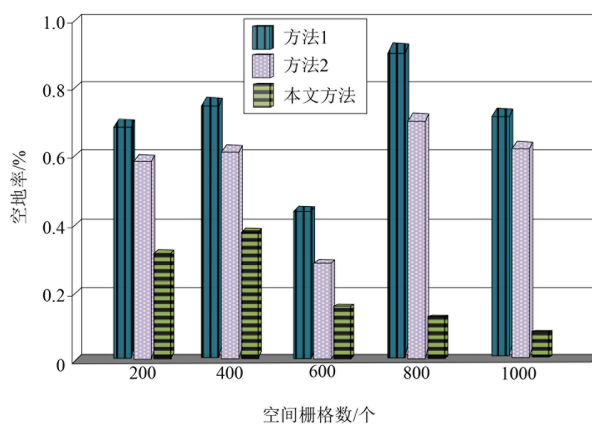


图3 基于不同方法的空间利用率对比

Fig.3 Comparison of space utilization based on different methods

3 结束语

基于多智能体粒子群算法的城乡空间规划方法融合了多智能体系统的决策协作和粒子群算法在实现过程中的优化特性。通过构建城乡空间规划模型,并利用优化算法的全局搜索能力,找到空间规划的最优解。该方法为城乡空间规划提供了新的视角和工具,有助于实现空间资源的优化配置和可持续发展。

参考文献

- [1] 焦红,王超.基于GIS和RS技术下的城市空间规划支持系统设计[J].现代电子技术,2022,45(02):140-144.
- [2] 段芳.基于无人机遥感影像的城乡居民点空间布局规划研究[J].科技通报,2023,39(01):40-43+48.

- [3] 许宏福, 宁昱西, 林若晨. 基于空间活力模拟的城镇开发边界划定研究——以北海市国土空间规划为例[J]. 规划师, 2020, 36(12): 83-89.
- [4] Akin D, Ocalir E V. Delineating functional regions as new strategic and spatial planning clusters and identifying megaregions based on intercity freight flows and a composite economic index: Case of Turkey[J]. Journal of urban planning and development, 2023, 22(17): 133-136.
- [5] Cyriac S, Firoz C M. Dichotomous classification and implications in spatial planning: A case of the rural-urban continuum settlements of Kerala, India[J]. Land Use Policy, 2022, 42(30): 124-128.
- [6] 韩依纹, 胡诗琪, 万明暄, 等. 多元分析技术介入的国土生态空间规划探究——以湖北省襄阳市为例[J]. 中国园林, 2023, 39(08): 29-35.
- [7] 徐飒然. 基于激光投影的空间布局规划优化设计[J]. 激光杂志, 2023, 44(07): 229-233.
- [8] 冯卫, 唐亚明, 贾俊, 等. 一种基于地质灾害风险评价的山区城镇国土空间规划优化方法[J]. 西北地质, 2023, 56(03): 232-238.
- [9] 李伊彤, 荣丽华, 郭丽霞. “三生”视角下牧区县域国土空间功能评价及分区优化——以锡林郭勒盟镶黄旗为例[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 123-127.
- [10] 付蒙, 余亮. CLUE-S模型在生态景观空间规划仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2023, 40(05): 220-223.
- [11] 赵炜, 张莉, 王超深. 基于韧性提升的乡村应急疏散空间规划方法与实践——以贵州省下司镇清江村为例[J]. 上海城市规划, 2023(02): 1-7.
- [12] 李卓, 刘星辰, 邵务兵, 等. 基于空间句法和相关分析的邮轮空间规划设计研究[J]. 装饰, 2023(04): 136-138.
- [13] 范玉龙, 赵天英, 丁圣彦. 基于“生态系统服务网”理论的国土空间规划研究[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4868-4875.
- [14] 冯旭, 王凯, 毛其智, 等. 国土空间规划体系下的乡村空间规划方法——基于规划与治理的一体化视角[J]. 城市规划, 2022, 46(11): 21-31.
- [15] 马婷, 邵战林, 吴彦山, 等. 永久基本农田保护区合理性评价及空间布局研究——基于国土空间规划视角[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 238-244.
- [16] 喻丁一, 冉静, 许乙青. 城市新区生态雨洪调蓄空间规划方法研究[J]. 城市发展研究, 2022, 29(04): 78-86.
- [17] 王子昂, 陶春辉, 宋成兵, 等. 国家管辖范围外区域海洋空间规划[J]. 地质通报, 2023, 42(10): 1674-1683.
- [18] 付海英, 李树君, 郝晋珉, 等. 基于系统思维的县域农业空间规划策略[J]. 规划师, 2023, 39(09): 71-77.