

引用格式: 刘羿伯, 张郝萍, 吴梓溶, 等. 基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地优化利用: 以牡丹江为例[J]. 资源科学, 2024, 46(2): 386–406. [Liu Y B, Zhang H P, Wu Z R, et al. Optimal utilization of low-efficiency industrial land in shrinking cities based on green infrastructure performance improvement: Take Mudanjiang as an example[J]. Resources Science, 2024, 46(2): 386–406.] DOI: 10.18402/resci.2024.02.11

基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市 低效工业用地优化利用 ——以牡丹江为例

刘羿伯^{1,2}, 张郝萍^{1,2}, 吴梓溶^{1,2}, 夏雷^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 哈尔滨 150001;

2. 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要:【目的】本文旨在系统性探讨收缩城市低效工业用地与绿色基础设施之间的优化转换路径与机制, 为中国收缩城市低效工业用地集约高效利用提供参考。【方法】本文以典型收缩城市牡丹江为例, 选取2021年份的相关研究数据, 利用层次分析法构建低效工业用地识别体系和绿色基础设施绩效评估体系, 运用TOPSIS法定量评估低效工业用地, 采用生态系统服务价值(ESV)修正系数法和Fragstats工具定量评估绿色基础设施绩效, 在此基础上建立基于绿色基础设施绩效提升的低效工业用地优化模型, 进一步揭示绿色基础设施与低效工业用地之间的转换机制。【结果】①牡丹江市建成区共有160块用地处于低效利用状态(共447.30 hm²), 占工业用地总数量的45.71%。②借助基于绿色基础设施绩效提升的低效工业用地优化利用模型发现, 牡丹江市有303.80 hm²低效工业用地可转换为绿色基础设施。③经优化模拟, 将67.92%低效工业用地转换为绿色基础设施, 可使绿色基础设施总体绩效提高10.18%。【结论】经实证, 从牡丹江低效工业用地优化利用提炼出的基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地转换机制, 可在防止低效工业用地进一步对城市发展产生负影响的基础上, 以“存量换增量”推动收缩城市空间高质量发展, 为收缩城市空间优化相关研究提供参考。

关键词: 收缩城市; 低效工业用地; 绿色基础设施; 评估体系; 优化利用; 牡丹江市

DOI: 10.18402/resci.2024.02.11

1 引言

中国城市社会经济由“高速度发展”转向“高质量发展”以来, 低效工业用地改造逐渐成为国家战略部署的建设重点之一, 中国在2013年和2016年分别出台相关文件对低效用地进行了界定, 并围绕低效用地再开发, 采取了诸多理论和实践尝试^[1,2]; 2023年9月自然资源部发布《自然资源部关于开展低效用地再开发试点工作的通知》, 并提出“以国土

空间规划为统领, 以城中村和低效工业用地改造为重点, 以政策创新为支撑, 推动各类低效用地再开发, 推动城乡发展从增量依赖向存量挖潜转变”。与此同时, 当前中国城市发展条件因全球发展格局变化及经济发展进入新常态而发生了结构性变化, 城市收缩现象愈发普遍, 伴随着人口持续减少和产业转型, 居民对城市空间需求量逐渐降低, 造成既有住宅、工业、商业、基础设施等用地的低效利用,

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(5230818); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2021E027); 黑龙江省哲学社会科学规划项目青年项目(22SHC307)。

作者简介: 刘羿伯, 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为计算性城市设计、收缩城市。E-mail: liuyibo9871@163.com

通讯作者: 夏雷, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 研究方向为绿色村镇规划、城乡收缩、乡村风貌规划技术与方法。E-mail: xialei@hit.edu.cn

2024年2月

甚至空置或废弃,继而诱发了城市安全隐患、财政负担加重、房产贬值等一系列消极影响^[3,4]。低效工业用地因其经济负担重、治理代价大、再开发难度高等特殊性成为收缩城市空间危机需要解决的核心问题之一。

在此背景下,如何“挖潜存量”推进低效工业用地再开发,促使低效工业用地再次发挥其生态、社会、经济价值,使收缩城市摆脱现实困境,成为各界讨论的重点问题。当前国内外学者针对低效工业用地的现状识别^[5,6]、评价体系构建^[7,8]、测度分析^[9,10]等方面已进行了深入探索,为低效工业用地优化利用提供量化手段。对于低效工业用地的优化利用,国外主要采取拆除新建、功能转换等措施对低效工业用地再利用^[11],从而解决城市郊区化^[11,12]和工业发展引起的环境退化现象^[13,14];国内主要采取升级工业企业^[15,16]和提升工业用地效率^[17]等一系列以增长为导向的措施,对低效工业用地进行优化利用。既有研究尚缺乏针对收缩城市低效工业用地再开发的策略探讨。面对中国收缩城市不断增多、传统工业基地工业空间冗余问题不断凸显的状况,需结合中国收缩城市发展背景和现实状况因地制宜地提出优化利用路径。

有研究表明,将绿色基础设施作为收缩城市低效工业用地再利用的更新路径,可激活低效工业用地的社会、经济价值^[18],积极回应人口收缩问题并将低效工业用地视为城市发展的潜在资源,能有效解决由人口流失和经济下行导致的大量空置或低效用地问题^[19-23]。既有研究对绿色基础设施能够解决收缩城市低效工业用地问题的有效性进行了充分证实^[24,25],但此类研究多集中在国外,国内相关研究主要集中在非收缩城市之中。由于收缩城市的发展动力与发展逻辑与非收缩城市不同^[26,27],加之中国低效工业用地再利用情况与国外也有一定差别,国外相关研究经验难以直接指导中国收缩城市低效工业用地转化为绿色基础设施。

因此,本文创新地采用多种量化方法,结合中国收缩城市实际情况,建立适用于中国收缩城市低效工业用地识别体系与绿色基础设施绩效评估体系并分别展开评价;建立了与增量时期大拆大建更新模式主导下不同的低效工业用地优化利用逻辑,以典型收缩城市牡丹江为例,以低效工业用地优化

利用和绿色基础设施绩效提升为目标,揭示绿色基础设施与低效工业用地之间的转换机制;结合实证基础,将绿色基础设施与低效工业用地之间的转换机制拓展应用到中国其他收缩城市之中,为收缩城市低效工业用地治理提供创新思路和有益参考。

2 研究框架

本文结合收缩城市特征,提出“体系构建—量化评估—策略探索”的研究框架(图1)。具体来说:

(1)收缩城市低效工业用地识别

在收缩城市低效工业用地识别上,从国际发展经验来看,收缩城市低效工业用地表征形式较为多样,存在的问题较为复杂,其中空间利用低效与空置作为工业用地面临的核心问题之一,可用于低效工业用地识别。国内对低效工业用地识别主要聚焦在非收缩型城市之中,而收缩城市与非收缩城市低效工业用地面临的问题有所不同,因此,收缩城市低效工业用地识别指标权重侧重点有所差异。基于国内外相关研究经验构建低效工业用地识别指标后,可采用多层次分析法(Aalytic Hierarchy Process, AHP)确定指标权重,并借助TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)法作为低效工业用地评估的方法。TOPSIS法经常用于多目标决策分析^[28,29],通过比较研究对象的“理想解”和“负理想解”的接近程度,来评价各研究对象的优劣程度。通过TOPSIS法对工业用地效率进行多目标数据综合分析,可全面、精确地反映研究范围内每块工业用地的相对效率,并对其结果客观排序,便于清晰掌握工业用地效率分布情况。

(2)收缩城市绿色基础设施绩效量化评估

在收缩城市绿色基础设施绩效评估上,基于已有研究、专家咨询和概念剖析,本文将生态服务功能和景观服务功能作为绿色基础设施绩效评估重点。2005年欧盟的千年生态系统评估项目(Millennium Ecosystem Assessment, MA)系统基于生态系统与人类福祉的关系研究,提出了支持服务、供给服务、调节服务和文化服务4类生态服务和相应的11种服务功能^[30]。本文在此基础上结合《牡丹江市“十四五”生态环境保护规划》中提到的主要生态问题与牡丹江市寒地城市和收缩城市等特征,重点考虑了寒地城市人口空间分布结构变化过程中,可能造成的植被覆盖度下降、大气污染、水体污染、热岛效应

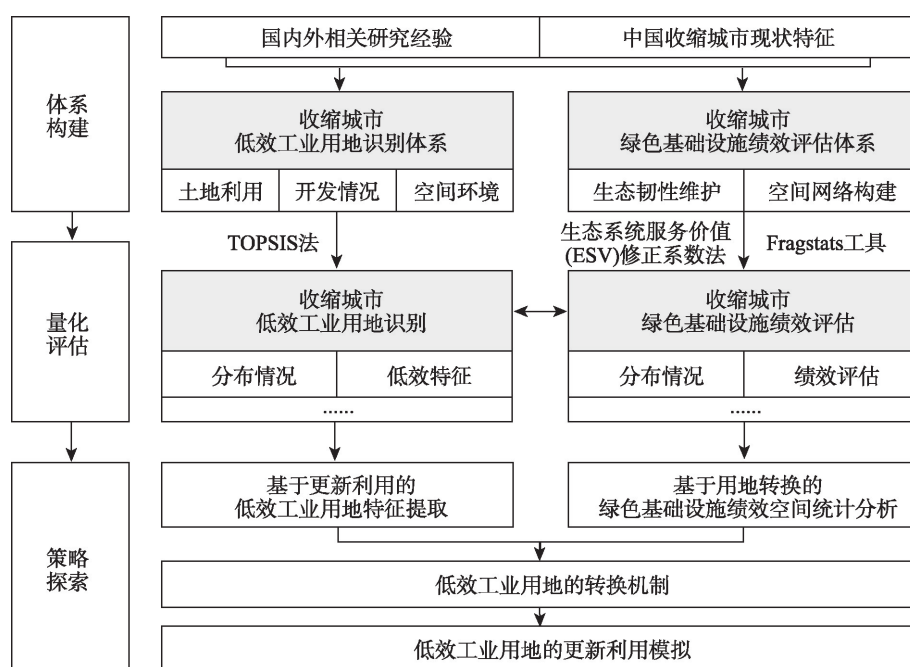


图1 研究框架

Figure 1 Framework of the research

等生态环境变化^[31-33],并选取相关指标。构建绿色基础设施绩效评估指标后,采用多层次分析法(AHP)确定权重。

绿色基础设施绩效由生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)修正系数法和Fragstats工具定量评估,以确保绩效评估的核心目的是探究绿色基础设施空间网络分布的合理性与现有绿色基础设施的生态韧性,为绿色基础设施优化建设提供依据。生态系统服务是人类从生态系统中直接或间接得到的产品和服务^[34]。本文利用ESV评估方法对部分生态韧性维护评估指标进行修正。ESV评估方法由谢高地等^[35]基于全球性的生态系统服务功能评价模型^[36]提出,该方法主要利用包含气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性维持、食物生产、原材料生产、休闲娱乐等生态系统服务功能指标在内的、适用于中国的生态系统服务价值当量因子表,来定义各类生态系统生态服务价值,对各类生态系统服务的使用价值和存在价值进行标准化评估。结合相关研究^[37-40]来看,ESV评估方法现广泛用于测度建成环境和自然地理环境的时空演变对城乡区域生态系统服务价值的影响,量化各类绿色基础设施服务功能的关系^[37]。但在评估过程中,ESV评估结果受不同自然

地理环境和评估指标的影响,需要考虑不同情景下ESV的影响元素,从而制定不同的评估方案^[40]。

绿色基础设施的分布情况在区域层面表现为景观格局,其变化影响生态系统组分、结构与生态等过程^[41],导致生态系统的能量流动和物质循环过程发生变化,从而改变绿色基础设施的生态韧性维护和空间网络构建绩效。本文选用由Fragstast软件计算的景观格局指数评估方法,构建评估指标体系。景观格局指数通过衡量绿色基础设施的面积、密度、边界、形态、多样性和聚散性等方面的要素,从而定量分析地区景观空间分布情况。根据景观格局指数的相关研究^[42-44],景观格局指数常用来监测同一地区景观格局的演变过程,可较为清晰地反映地区景观演变特征。

(3) 优化利用机制探索

结合低效工业用地识别结果,以及绿色基础设施生态韧性维护与空间网络构建两方面需求,本文通过建立基于绿色基础设施绩效提升的低效工业用地优化利用模型,进一步揭示绿色基础设施与低效工业用地之间的转换机制,为收缩城市低效工业用地提出优化利用策略。随着可持续发展理念的提出,国内外越来越多的地区开始从生态视角出发,借助转换为绿色基础设施等功能的方式再利用

城市低效用地,并探索产生了一系列转换路径。虽然这些研究与实践的具体实施策略有区别,但基本都采取了完善与丰富绿色基础设施网络的方式对低效工业用地进行转换。低效工业用地转换既需要考虑低效工业用地的负效应,又要考虑绿色基础设施绩效的正效应。因此,低效工业用地转换机制需结合绿色基础设施绩效的空间影响关系来共同推导,从而选取绿色基础设施绩效提升效率最高的低效工业用地转换路径^[45-48]。对此,本文首先探讨绿色基础设施的绩效与地理空间属性的关系,基于绿色基础设施绩效评估结果,提炼绿色基础设施绩效的空间特征与完善需求,提出低效工业用地转换机制,并模拟其优化利用后的绿色基础设施绩效结果,以验证转换机制的理论可行性。

3 研究方法、研究区与数据来源

3.1 指标构建

(1)低效工业用地评估指标体系

本文在参考相关研究^[7,10],遵循可操作、代表性等原则的基础上,将地理空间型数据作为识别体系的核心数据,从土地利用(B_1)、开发情况(B_2)、空间环境(B_3)3个维度综合选取9个指标构建了低效工业用地识别指标体系(表1)。

土地利用(B_1)反映了工业用地现阶段使用状况,常常会受到社会、经济、空间发展等因素影响,在工业用地中主要反映在区位环境条件、经营情况

等方面,选取区位适宜发展程度(C_1)、土地利用主体(C_2)、基准地价(C_3)3个指标来表征土地利用的整体状况;开发情况(B_2)可以反映工业用地的建筑布局、建设和使用情况,一般可以由工业用地内建筑的利用强度及利用效益高低、空间集聚状况、产业类型来衡量,选取容积率(C_4)、建筑密度(C_5)、工业门类(C_6)3个指标来表征工业用地建设状况;空间环境(B_3)反映了工业用地内部空气质量、空间质量、环境质量的整体状况,工业用地物质空间环境的好坏程度在一定程度上影响了企业工业的生产,选取绿化覆盖率(C_7)、环境污染程度(C_8)、建筑质量(C_9)3个指标来表征工业用地环境状况。

为确定收缩城市背景下低效工业用地识别指标权重,本文采用AHP法,建立了收缩城市低效工业用地识别层次结构模型,分别为准则层、指标层构造判断矩阵;通过各要素之间相互两两比较来确定各指标权重,利用1~9比率标度法对同层各指标的相对重要性进行两两比较,在通过一致性检验基础上,得出低效工业用地评价体系各级识别指标的权重(表1)。从准则层指标的权重值来看, B_1 、 B_2 、 B_3 权重分别为0.42、0.46、0.12。根据准则层中3类指标权重,测得指标层中9类指标综合权重,其中 C_4 权重最大,为0.21, C_7 权重最小,为0.02。

(2)绿色基础设施绩效评估指标体系

绿色基础设施绩效评估主要针对生态服务功能

表1 低效工业用地识别指标权重

Table 1 Weights of indicators for identifying inefficient industrial land use

目标层	准则层	权重	指标层	指标说明	权重
低效工业用地 (A)	土地利用(B_1)	0.42	区位适宜发展程度(C_1)	工业用地的地理位置,分为城市核心区域内(半径为3~5 km)、城市边缘区、产业园或开发区3类	0.17
			土地利用主体(C_2)	对工业企业现状经营情况的描述,包括停产闲置、全部出租、部分出租、继续营业等	0.16
			基准地价(C_3)	工业用地区位环境条件以及可使用程度的价值	0.09
	开发情况(B_2)	0.46	容积率(C_4)	企业工业用地的利用强度及利用效益高低	0.21
			建筑密度(C_5)	工业用地的空间集聚状况	0.10
			工业门类(C_6)	工业区/点的主导产业与政府政策导向的关系,结合《国民经济行业分类》,工业行业划分为鼓励发展型、落后淘汰型、限制发展型及其他类型	0.15
	空间环境(B_3)	0.12	绿化覆盖率(C_7)	工业用地面积中绿化覆盖的比重	0.02
			环境污染程度(C_8)	工业企业生产行为对环境产生的影响,按照工业企业所属行业排污指数取值	0.04
			建筑质量(C_9)	工业用地内部物质空间环境的好坏程度,是对建筑结构、外观的完整性以及坚固性等的综合评价	0.06

和景观服务功能展开,两者分别体现生态韧性的维护程度和景观空间网络的构建程度。对此,绿色基础设施绩效(D)评估指标体系从生态韧性维护(E_1)和空间网络构建(E_2)两方面综合选取13个指标(表2)。

在生态韧性维护(E_1)方面,本文选取空气净化(F_1)、固碳效应(F_2)、降噪效应(F_3)、降温效应(F_4)、水文调节(F_5)、土壤保持(F_6)、生物多样性(F_7)、生态稳定性(F_8)等指标作为适用于寒地收缩城市的分类评估标准。其中, F_1 – F_6 主要反映不同类型绿色基础设施的生态服务能力,可以通过使用ESV评估方法量化计算; F_7 反映了维护和发展生态多样性的潜力; F_8 反映了研究区域生态系统的稳定性。

在空间网络构建(E_2)方面,选取空间分布结构(F_9)、斑块破碎度(F_{10})、斑块分布均匀度(F_{11})、廊道连通性(F_{12})、景观形状(F_{13})作为评估指标。其中, F_9 用以量化绿色基础设施空间分布结构; F_{10} 直接影响了城市绿色基础设施功能和作用的体现,指标数值越低则越有利于绿色基础设施发挥功能; F_{11} 量化绿色斑块的分布情况; F_{12} 是指通过强化绿色基础设施的联系性来保护生物多样性和增强对气候变化

适应力; F_{13} 表征绿色基础设施的形状复杂程度。

为确定收缩城市背景下绿色基础设施绩效评估指标权重,同样采用AHP法,建立了收缩城市背景下绿色基础设施绩效评估层次结构模型。针对各指标的相对重要性进行评分,得出绿色基础设施绩效评估体系中各级指标的权重(表2)。从准则层指标的权重值来看, E_1 维度中 F_7 和 F_8 指标权重较大,分别为0.10和0.12; E_2 维度中的 F_9 和 F_{12} 指标权重较大,分别为0.17和0.11。

3.2 评估与优化方法

3.2.1 TOPSIS法

本文采用TOPSIS法作为低效工业用地评估的方法。首先,采用min-max标准化模型,根据公式(1)将数据标准化处理,消除量纲影响;其次,利用公式(2)构建标准化矩阵,并通过公式(3)计算各评价指标与最优及最劣向量之间的差距;最后,利用公式(4)测度评价对象与最优方案的接近程度。

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

式中: x' 为数据标准化处理结果; x 为样本数据; $\max(x)$ 、 $\min(x)$ 分别为样本数据的最大值和最小值。

表2 绿色基础设施绩效评估指标权重

Table 2 Weights of indicators for green infrastructure performance assessment

目标层	准则层	权重	指标层	指标说明	权重
绿色基础设施绩效(D)	生态韧性维护绩效(E_1)	0.5	空气净化(F_1)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的空气净化能力	0.06
			固碳效应(F_2)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的固碳能力	0.05
			降噪效应(F_3)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的降噪能力	0.02
			降温效应(F_4)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的降温作用	0.03
			水文调节(F_5)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的洪水调蓄和保障水供应能力	0.05
			土壤保持(F_6)	通过ESV评估方法量化绿色基础设施的土壤保持能力	0.07
			生物多样性(F_7)	主要使用景观丰富度指数和香农多样性指数,量化绿色基础设施为生物提供栖息地以及迁徙和活动交流的通道的能力	0.10
			生态稳定性(F_8)	绿色基础设施总面积占研究区域总面积比和林地与草地面积占绿色基础设施面积比之和	0.12
	空间网络构建绩效(E_2)	0.5	空间分布结构(F_9)	各类绿色基础设施面积及其在总研究区域的占比	0.17
			斑块破碎度(F_{10})	主要使用破碎化指数和斑块聚集度量化说明,斑块破碎程度越低则越有利于绿色基础设施功能的发挥	0.08
			斑块分布均匀度(F_{11})	使用Shannon均匀度指数,量化绿色斑块的分布情况,斑块分布越均匀,则绿色基础设施在城市中分布越均匀,更有利于提高绿色基础设施网络的完整度	0.08
			廊道连通性(F_{12})	使用蔓延度指数和连通性指数,量化绿色基础设施的物质能量交换能力	0.11
			景观形状(F_{13})	使用景观形状指数,量化绿色基础设施的形状复杂程度,形状不规则度越高,绿色基础设施单元涵盖的生态功能和信息越丰富	0.06

2024年2月

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik})^2}} \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为第 i 个对象的第 j 个指标加权后的标准化值, $i, j \in [1, n]$, n 为整数; 针对低效工业用地识别体系构建 i 行 j 列的矩阵 X , 矩阵 X 中元素 x_{ij} 表示第 i 个对象的第 j 个指标的值。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^+ - Z_{ij})^2}, D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^- - Z_{ij})^2} \quad (3)$$

式中: D^+ 为正理想解距离; D^- 为负理想解距离; ω_j 为第 j 个属性的权重; Z_j^+ 、 Z_j^- 分别为第 j 个指标取值中最偏好方案值和最不偏好方案值。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (4)$$

式中: C_i 为第 i 个评价对象与理想解的贴近度, $0 \leq C_i \leq 1$, 且 C_i 越大, 表示该工业用地效率越高; 反之, 说明工业用地越低效。

3.2.2 生态系统生态服务价值(ESV)评估方法

ESV 评估方法首先根据研究区域的主要粮食作物播种面积和单产量计算农田生态系统单位面积食物生产服务的经济价值, 然后将 1 hm^2 农田的每年自然粮食产量的经济价值定义为 1, 将没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值量定义为农田生态系统单位面积食物生产服务的经济价值的 $1/7$, 从而换算得到其他生态系统生态服务价值相对于农田食物生产服务的贡献大小, 并形成生态系统生态服务价值当量因子, 见公式(5):

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{r=1}^l \frac{s_r p_r q_r}{S} \quad (5)$$

式中: E_a 为农田生态系统单位面积的食物生产服务功能的经济价值(元/ hm^2); r 为研究区域第 r 种主要粮食作物种类($r=1, 2, \dots, l$); s_r 为第 r 种粮食作物面积(hm^2); p_r 为第 r 种作物全国平均价格(元/t); q_r 为第 r 种作物单产(t/hm^2); S 为 l 种作物的总面积(hm^2)。

3.2.3 Fragstast 景观格局分析法

本文借助由 Fragstast 软件计算的景观格局指数评估方法, 从空间网络构建和生态韧性维护两个层面构建评估指标体系。Fragstast 提供了基于栅格单元、景观功能单元和影像整体范围的景观格局分析模块, 可全面分析各类景观要素(包括斑块、廊道、基质等层面)的空间分布特征和异质性^[49]。

3.2.4 空间统计分析法

除应用常规数理统计对数据进行分析外, 还应应用空间统计分析方法对数据基于空间位置和属性的空间分布进行了分析, 从空间对象的空间位置、联系等方面出发, 研究数据在空间分布上的随机性、结构性、相关性和依赖性等特征。

本文分别使用 Global Moran's I 分析法和 Getis-Ord General G 分析法(表 3)分析绿色基础设施的全局空间自相关性, 使用 Anselin Local Moran's I (即 Lisa 聚类)分析法和 Getis-Ord G_i^* 分析法分析绿色基础设施绩效的局部空间自相关性。Global Moran's I 分析法用于统计衡量总体数据相邻空间分布对象属性值是否具有集聚特征。Getis-Ord General G 分析法可基于 Global Moran's I 分析法判断聚集数据呈高值聚集还是低值聚集。Anselin Local Moran's I 分析法通过计算每一个空间单元与邻近单元的特定属性数据相关性来分析局部的空间相关性, 倾向于量化数据空间聚集中心, 且计算高值聚集现象的精度高于低值集聚现象。Getis-Ord G_i^* 分析法倾向于识别研究范围整体的数据聚集状况, 且计算低值聚集现象的精度也较高, 可作为 Anselin Local Moran's I 分析的补充和验证。

3.3 研究区域

本文以牡丹江主要建成区为研究区域。牡丹江作为黑龙江省东南部区域性中心城市、中国老工业基地之一, 近年来人口持续减少。据全国人口普查数据显示, 2010—2020 年牡丹江市域总人口减少

表 3 空间统计分析方法分析机制

Table 3 Mechanism of analysis of the spatial statistical analysis method

z 得分	P 值	置信度	空间相关性
(-1.650, 1.650)	—	—	不具有相关性
(-1.960, -1.650]U[1.650, 1.960)	<0.100	90%	具有相关性
(-2.580, -1.960]U[1.960, 2.580)	<0.050	95%	具有显著的相关性
(-∞, -2.580]U[2.580, +∞)	<0.010	99%	具有非常显著的相关性

了50.85万人。其中,牡丹江市区人口规模在2014年到达增长顶峰(88.94万人),此后人口发展陷入负增长;到2020年时,牡丹江市区已减少了3.53万人。2014年后牡丹江经济发展速度放缓甚至停滞,市区生产总值呈现负增长状态,2019—2020年牡丹江人均GDP持续低于黑龙江省人均GDP。作为典型收缩城市,牡丹江目前面临人口收缩和经济停滞、生态环境不断恶化的情况,加之城市内部绿色基础设施多为农田,难以直接利用,城市空间品质不断下降。

此外,工业作为牡丹江的支柱性产业,在2014年后呈现负增长状态,大量工业用地处于低效或闲置状态,工业发展面临巨大挑战。研究区域内工业用地历史悠久、类型丰富,具有鲜明特征:包含了不同时期的工业用地,既包括建国初期成立的牡丹江木材综合加工厂、北方工具厂等大中型国营工业企业,又包含牡丹江恒丰纸业股份有限公司、友博药业等新兴企业;同时,工业空间布局模式丰富,包括城市中心区或近郊分散分布、工业园区集聚分布等多种方式,且各种布局模式之间存在一定的差异性。因此,研究区域极具代表性。

3.4 数据来源

本文数据主要包括2021年牡丹江市相关的社会经济数据和地理空间数据。其中,牡丹江人口变化、牡丹江生产总值、牡丹江产业发展等社会经济数据主要来源于《牡丹江市构建现代产业体系发展规划(2021—2025年)》《中国农产品价格调查年鉴》、牡丹江第六、七次全国人口普查主要数据公报、相应年份的《牡丹江市统计年鉴》和《黑龙江统计年鉴》等资料;牡丹江建设用地变化、研究区域工业用地现状分析、牡丹江建成区工业企业信息、人口空间分布等地理空间数据主要来源于牡丹江第三次国土调查数据、牡丹江市卫星影像图、OSM地图(OpenStreetMap)、实地调查数据、中国年度土地覆盖数据集(Annual China Land Cover Dataset, CLDC)、WorldPop100 m×100 m分辨率人口栅格数据(Open Spatial Demographic Data and Research)^[50]以及牡丹江相关规划等资料。

4 结果与分析

4.1 牡丹江低效工业用地评估结果

牡丹江低效工业用地识别借助TOPSIS法,采

用相对接近系数值(C_i)来量化表征每一个工业用地综合效率的大小,并将其作为识别结果。为清晰掌握牡丹江用地效率分布情况,在参考荆莹^[7]、魏新星等^[20]的做法,采用自然断点法对工业用地绩效评价结果数值进行划分的基础上,将低效工业用地识别结果中不连续的数据点作为分级依据,基于牡丹江建成区工业用地效率整体情况,将识别结果划分为高效集约利用型、一般适度利用型、一般低效利用型和低效粗放利用型4级,使得识别结果各类型内差异最小,类型间差异最大,其中,一般低效利用型和低效粗放利用型属于低效工业用地。具体情况见图2、表4。从用地规模上看,牡丹江建成区工业用地以一般适度利用型利用为主,共645.86 hm²,占工业用地总量的41.68%;一般低效利用型和低效粗放利用型工业用地共447.30 hm²,占总量的28.87%。从工业企业数量上来看,牡丹江建成区共有160块用地处于低效利用状态,占工业用地总数量的45.71%。从空间分布情况来看,建成区的产业

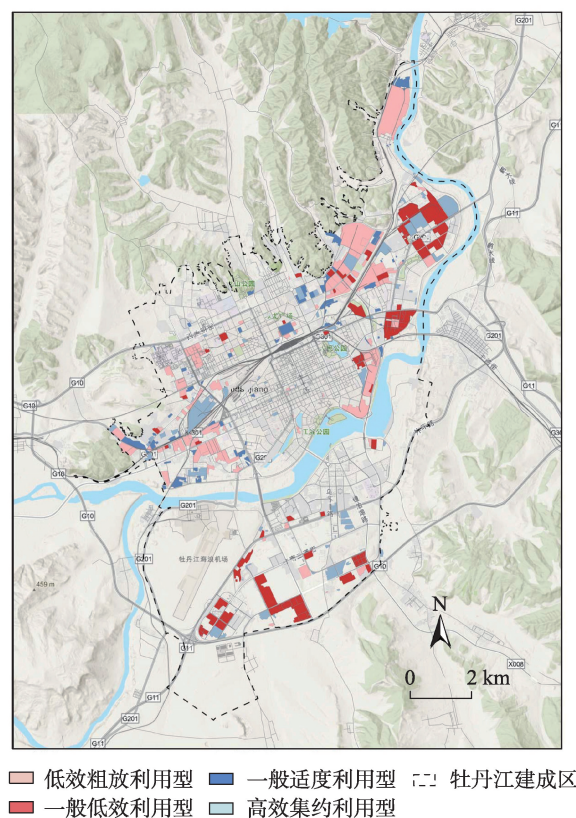


图2 牡丹江建成区工业用地的效率分布情况

Figure 2 Distribution of industrial land use efficiency in the built-up area of Mudanjiang City

表4 牡丹江建成区低效工业用地综合识别结果

Table 4 Comprehensive identification results of inefficient industrial land use in the built-up areas of Mudanjiang City				
类型	面积/hm ²	面积占比/%	数量/块	识别分值区间跨度
高效集约利用型	456.39	29.45	71	0.508~0.662
一般适度利用型	645.86	41.68	119	0.394~0.507
一般低效利用型	288.74	18.64	81	0.268~0.393
低效粗放利用型	158.56	10.23	79	0.123~0.267
总计	1549.55	100.00	350	0.123~0.662

园区内工业用地效率相对较高,其中73.25%的高效集约利用型工业用地位于产业园区;相反,牡丹江建成区城市核心区(半径为3~5 km)或城市边缘区域工业用地效率相对较低,67.70%低效工业用地位于城市核心区(半径为3~5 km)或城市边缘区域,这些低效工业用地的规模相对较小,空间分布上相对零散,难以形成产业集聚效应。

4.2 牡丹江绿色基础设施绩效评估结果

牡丹江建成区总面积为11736.81 hm²,建成区内绿色基础设施面积共4950.37 hm²,占建成区面积的42.18%,主要包括农田、森林、灌木、草地、水域、湿地和未利用地,类型较丰富。大部分绿色基础设施分布在牡丹江南岸,其余绿色基础设施大多沿江分布或处于建成区边缘(图3、表5)。本文通过人均受绿色基础设施绩效服务水平指标探讨人口收缩对绿色基础设施绩效的影响,该指标用100 m×100 m分辨率下绿色基础设施绩效与人口空间分布值的比值来计算。为了提高生态韧性维护评价指标对研究区域的适配性,本文基于《黑龙江2022年统计年鉴》和《中国农产品价格2022年调查年鉴》提供的粮食产量经济价值数据,得出适用于黑龙江省的当量因子修正系数,对部分生态韧性维护评估指标进行修正。

结合绿色基础设施的分布情况和人口分布情况,绿色基础设施整体绩效和人均受绿色基础设施

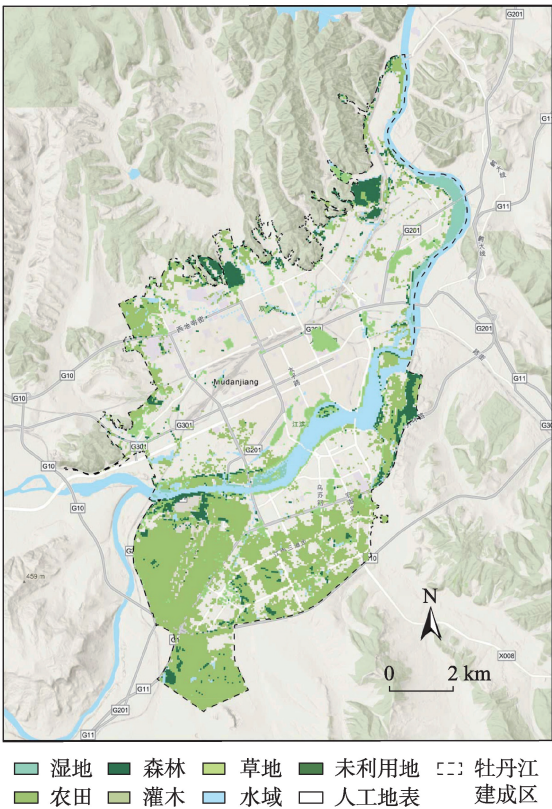


图3 牡丹江绿色基础设施分布

Figure 3 Distribution of green infrastructure in Mudanjiang City

表5 黑龙江省单位面积生态系统服务功能价值的基础当量表

Table 5 Basis of ecosystem service function value per unit area in Heilongjiang Province								
生态系统服务功能价值	农田	森林	灌木	草原	水域	冰雪	裸地	湿地
空气净化	1.421	25.585	18.193	6.254	78.886	2.274	1.421	2.274
固碳效应	9.523	29.422	20.041	7.249	10.945	2.558	0.284	2.558
降噪效应	0.853	14.313	9.807	3.553	26.864	1.279	0.142	1.279
降温效应	5.117	88.125	60.124	19.046	32.549	7.675	0.000	7.675
水文调节	3.838	54.865	47.618	13.929	1453.204	101.343	0.426	101.343
土壤保持	14.640	35.818	24.447	8.812	13.219	0.000	0.284	0.000
生态系统总体服务价值	35.392	248.128	180.230	58.843	1615.667	115.129	2.557	115.129

绩效服务水平的峰值均集中在牡丹江主要建成区南部(图4、图5),中部有中值分散分布,北部相应的绩效和人均绩效服务水平均不显著。对照图3-图5发现,绿色基础设施的整体绩效与绿色基础设施面积占比相关性较大,人口数量和密度未对绿色基础设施的绩效服务水平带来显著影响。

图4和图6表明,生态韧性维护总绩效评估值和该层面各指标绩效不完全重合,呈非线性正向关系,其中水文调节、降噪效应、空气净化的绩效评估结果与总指标结果大抵相同,呈现南高北低的趋势。土壤保持、降温效应、固碳效应的绩效评估结果虽然也在南部普遍达到峰值,但中部也有分散的中低值分布。生态稳定性绩效评估结果在南部有显著的峰值集中分布,在中部有显著的中值集中分布,在北部有显著的低值集中分布,形成明显的数据空间分层。生物多样性绩效评估结果呈现峰值

邻近建成区行政地域边界、在牡丹江流域集中分布、南部中高值分布较多的空间特征。在空间网络构建绩效中(图7),斑块破碎程度和廊道连通性之间,斑块破碎程度和斑块分布均匀度之间呈非线性的反向关系。空间分布结构从南至北逐渐显著:南部空间结构密度峰值地带的绿色基础设施面积最大,分布最为密集,中部空间分布结构紧凑度有所降低,但间歇有相对紧凑区域出现,具有一定成为景观廊道的潜力,北部未形成紧凑的景观结构,且人口数量和分布对人均空间网络构建绩效服务水平有一定影响。

总结来说,牡丹江建成区绿色基础设施分布密度和类型不均,整体分布面积从南至北非线性递减。其中,农田、森林、灌木和水域的面积占比越大,生态韧性维护绩效越高。绿色基础设施类型越丰富,面积占比越大,对城市建设用地的渗透性越强,空间网络构建绩效就越高。人口数量和密度对绿色基础设施的整体绩效服务水平以及生态韧性

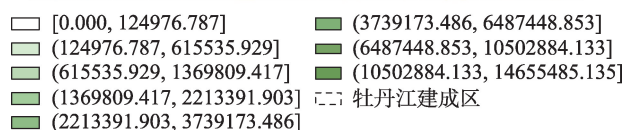
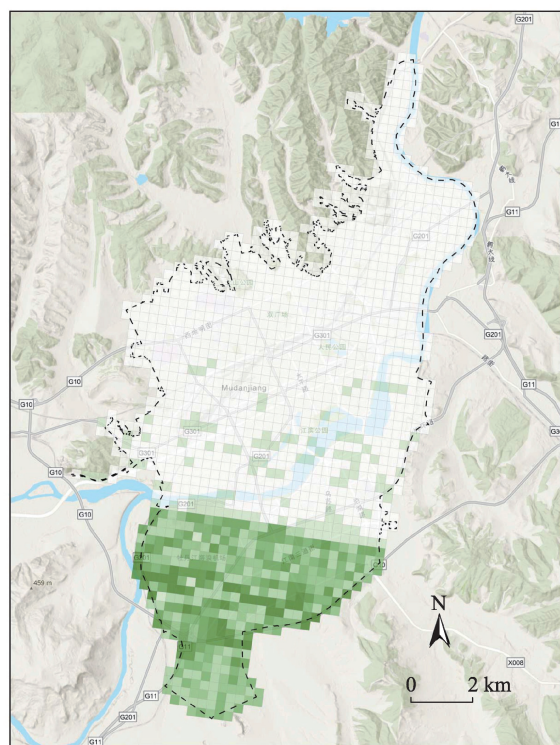


图4 绿色基础设施整体绩效评估结果

Figure 4 Results of the overall green infrastructure performance assessment

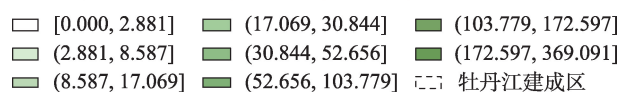
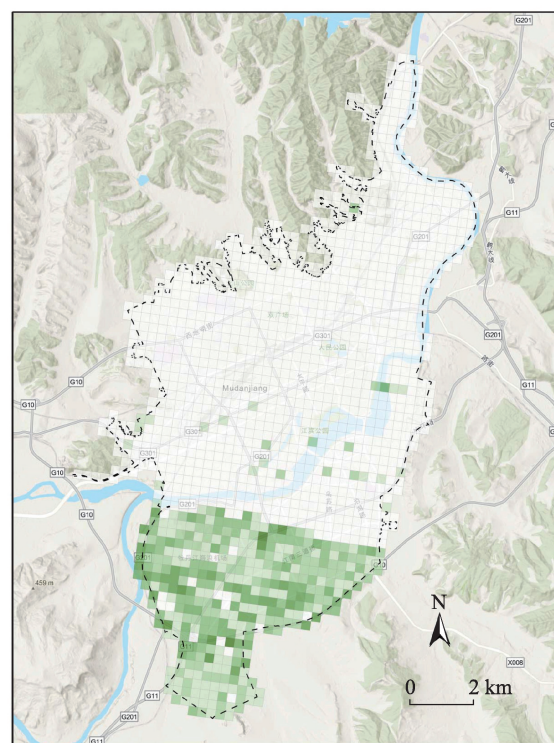


图5 人均受绿色基础设施绩效服务水平结果

Figure 5 Per capita exposure to green infrastructure service

2024年2月

维护绩效服务水平的影响不显著,但对空间网络构建绩效服务水平有一定影响,评估结果见表6。

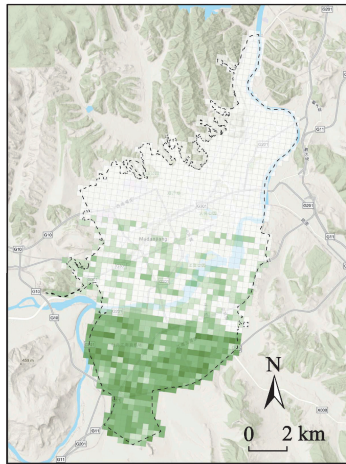
4.3 牡丹江建成区低效工业用地转换机制

基于“生态韧性维护绩效南高北低,空间网络建构绩效边界高中心低”的绿色基础设施绩效评估

结果,在探讨绿色基础设施的绩效与地理空间属性的关系基础上,提出低效工业用地的转换机制,并模拟其优化利用后的绿色基础设施绩效结果验证转换机制的可行性。

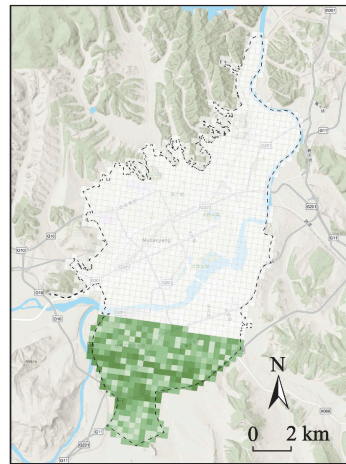
第一环节探讨绿色基础设施绩效的空间相关

a. 土壤保持



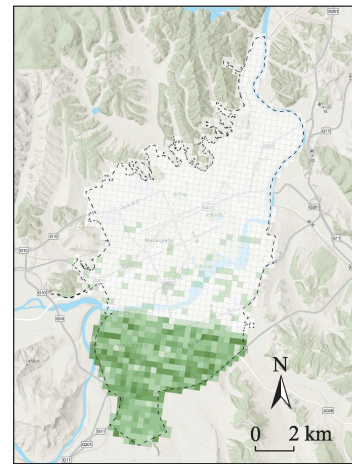
□ [0.000, 23016.960]
 □ (23016.960, 69639.782]
 □ (69639.782, 120201.523]
 □ (120201.523, 174204.288]
 □ (174204.288, 235425.254]
 □ (235425.254, 319793.126]
 □ (319793.126, 449276.774]
 □ (449276.774, 588839.270]
 □ 牡丹江建成区

b. 水文调节



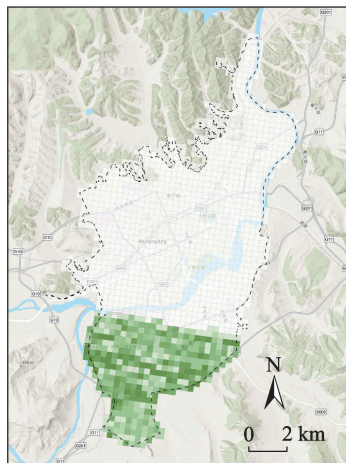
□ [0.000, 152258.918]
 □ (52258.918, 629186.458]
 □ (629186.458, 1063467.418]
 □ (1063467.418, 1809512.986]
 □ (1809512.986, 3167972.352]
 □ (3167972.352, 5677467.494]
 □ (5677467.494, 9323277.926]
 □ (9323277.926, 1285432.563]
 □ 牡丹江建成区

c. 降温效应



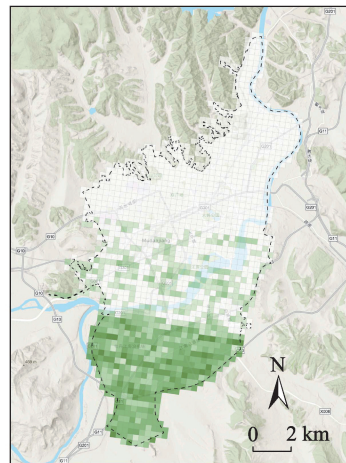
□ [0.000, 8225.280]
 □ (8225.280, 31991.962]
 □ (31991.962, 62657.510]
 □ (62657.510, 93316.378]
 □ (93316.378, 129739.622]
 □ (129739.622, 185150.822]
 □ (185150.822, 268449.638]
 □ (268449.638, 378764.237]
 □ 牡丹江建成区

d. 降噪效应



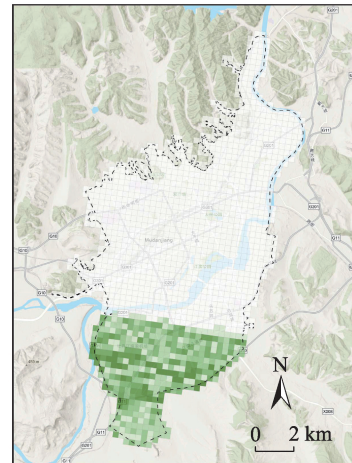
□ [0.000, 4406.400]
 □ (4406.400, 11669.760]
 □ (11669.760, 17580.902]
 □ (17580.902, 26894.822]
 □ (26894.822, 39513.830]
 □ (39513.830, 57478.579]
 □ (57478.579, 80819.251]
 □ (80819.251, 117453.773]
 □ 牡丹江建成区

e. 固碳效应



□ [0.000, 11520.000]
 □ (11520.000, 36864.000]
 □ (36864.000, 69884.698]
 □ (69884.698, 102670.157]
 □ (102670.157, 138090.470]
 □ (138090.470, 187165.670]
 □ (187165.670, 254562.509]
 □ (254562.509, 340800.768]
 □ 牡丹江建成区

f. 空气净化



□ [0.000, 25043.558]
 □ (25043.558, 70541.107]
 □ (70541.107, 119319.552]
 □ (119319.552, 187685.683]
 □ (187685.683, 269332.070]
 □ (269332.070, 392374.886]
 □ (392374.886, 592308.634]
 □ (592308.634, 841903.718]
 □ 牡丹江建成区

接下页

续图6

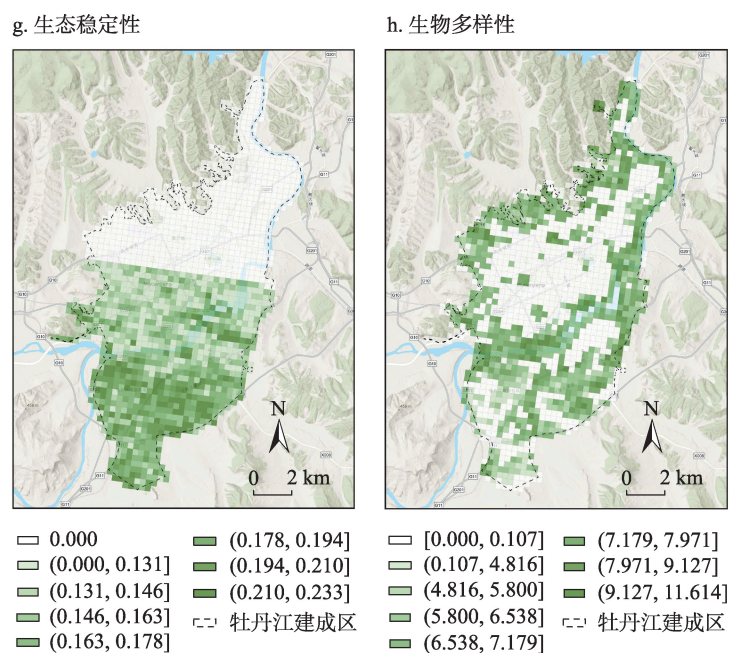


图6 生态韧性维护各指标绩效评估结果

Figure 6 Results of the performance assessment of the indicators of ecological resilience maintenance

性。首先,分析绿色基础设施绩效的全局空间自相关性,探讨绿色基础设施绩效整体分布状况,并判断是否具有聚集特性;其次,根据绿色基础设施绩效的全局空间自相关性结果,对绿色基础设施绩效的局部空间自相关性进行分析,排除绿色基础设施绩效在局部地区呈空间非正相关的可能性,探讨绿色基础设施绩效在空间上发生集聚的位置,以揭示绿色基础设施的生态韧性维护和空间网络构建的内在分布规律。

第二环节探讨牡丹江建成区低效工业用地转换机制,基于第一环节指出的绿色基础设施空间布局分布特征,以低效工业用地的区位和社会经济信息为依据,构建低效工业用地转换机制。

(1)牡丹江建成区绿色基础设施绩效的空间相关性

在全局空间自相关性分析中,Global Moran's I 分析结果表明(表7),绿色基础设施整体绩效、生态韧性维护绩效和空间网络构建绩效 p 值均为0.000(p 值=0.000<0.010),说明绿色基础设施各指标层绩效在空间上呈显著空间正相关, z 得分均远高于2.580,说明绿色基础设施绩效仅有小于1%的不具有空间聚类特征的可能性,拒绝零假设。可进一步

通过局部空间自相关性分析来量化绿色基础设施绩效在空间的热点区域。经过Getis-Ord General G 分析(表7),绿色基础设施整体绩效、生态韧性维护绩效和空间网络构建绩效三者的 p 值均为0.000(p 值=0.000<0.010),说明绿色基础设施各指标层绩效在空间上呈显著自相关, z 得分依然远高于2.580,说明绿色基础设施各指标层绩效具有非常显著的高值聚类特征,即从建成区整体视角来看,绿色基础设施绩效高值往往和高值聚集,但尚不能排除建成区局部地区出现绿色基础设施绩效空间负相关或离散的现象。

在局部空间自相关性分析中,Anselin Local Moran's I 分析结果表明,绿色基础设施整体绩效在建成区南部主要以高值聚集为主(图8a),但内部含有部分由高值包围低值而出现的异常值,这些异常值的相应 p 值和 z 得分互不对应(图8b、8c),进一步验证南部部分区域的绿色基础设施绩效无空间聚集现象,可能呈离散分布。异常值对应的主要绿色基础设施是农田附近的灌木地、草地和水体,它们规模相对较小,用地形态破碎,这表明南部非农田类型的绿色基础设施虽然生态韧性维护绩效水平较高,但是因为空间网络构建程度较低,整体绩效

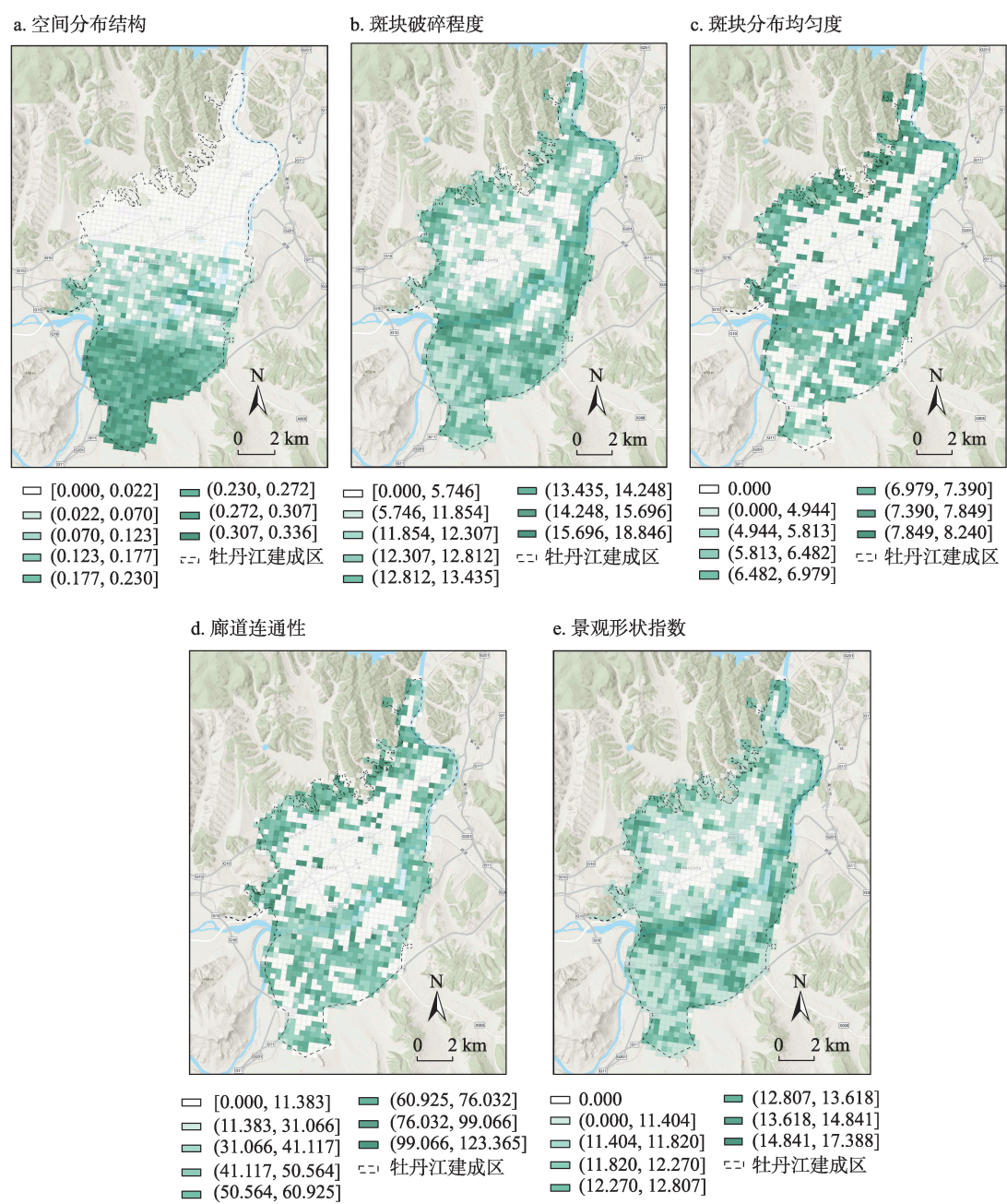


图7 空间网络构建各指标绩效评估结果

Figure 7 Results of the performance assessment of the indicators of spatial networking

表6 绿色基础设施绩效评估结果

Table 6 Results of green infrastructure performance assessment

绩效类型	绩效名称	绩效评估结果
总体绩效	生态韧性维护绩效	1431976166.231
	空间网络构建绩效	80755.527
	绿色基础设施总绩效	1432056921.758
人均绩效服务水平	人均生态韧性维护绩效服务水平	8748.328
	人均空间网络构建绩效服务水平	17.711
	人均绿色基础设施绩效服务水平	8766.039

表7 绿色基础设施绩效空间自相关性分析结果

Table 7 Results of spatial autocorrelation analysis of green infrastructure performance

分析方法	数据类型	<i>p</i> 值	<i>z</i> 得分
Global Moran's <i>I</i> 分析法	整体绩效	0.000	32.902
	生态韧性维护绩效	0.000	32.902
	空间网络构建绩效	0.000	22.426
Getis-Ord General <i>G</i> 分析法	整体绩效	0.000	32.698
	生态韧性维护绩效	0.000	32.698
	空间网络构建绩效	0.000	22.898

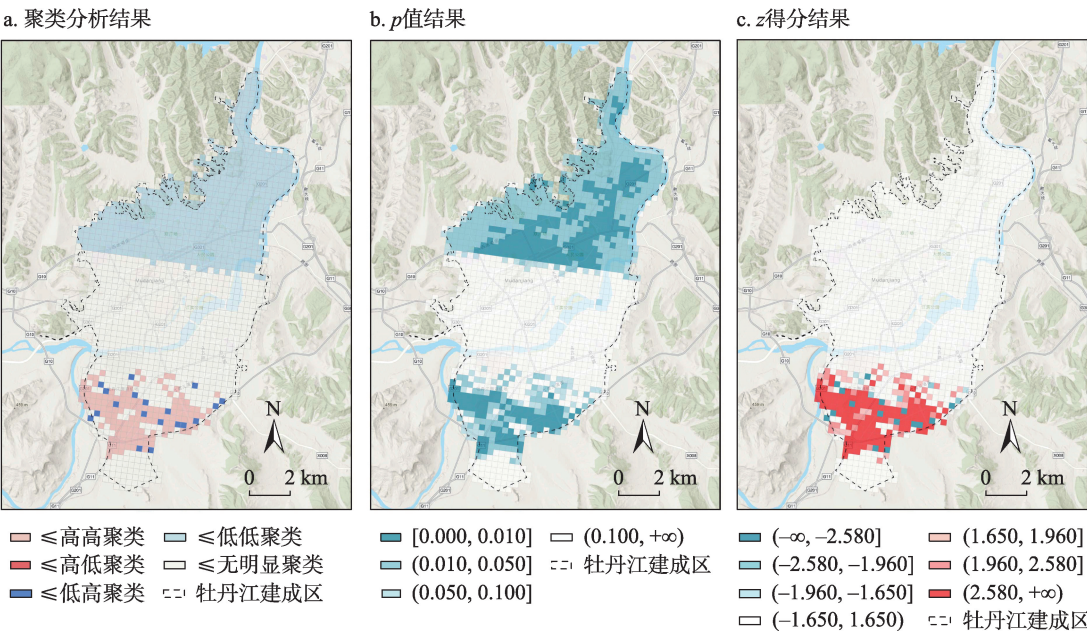


图8 绿色基础设施整体绩效 Anselin Local Moran's *I* 分析结果

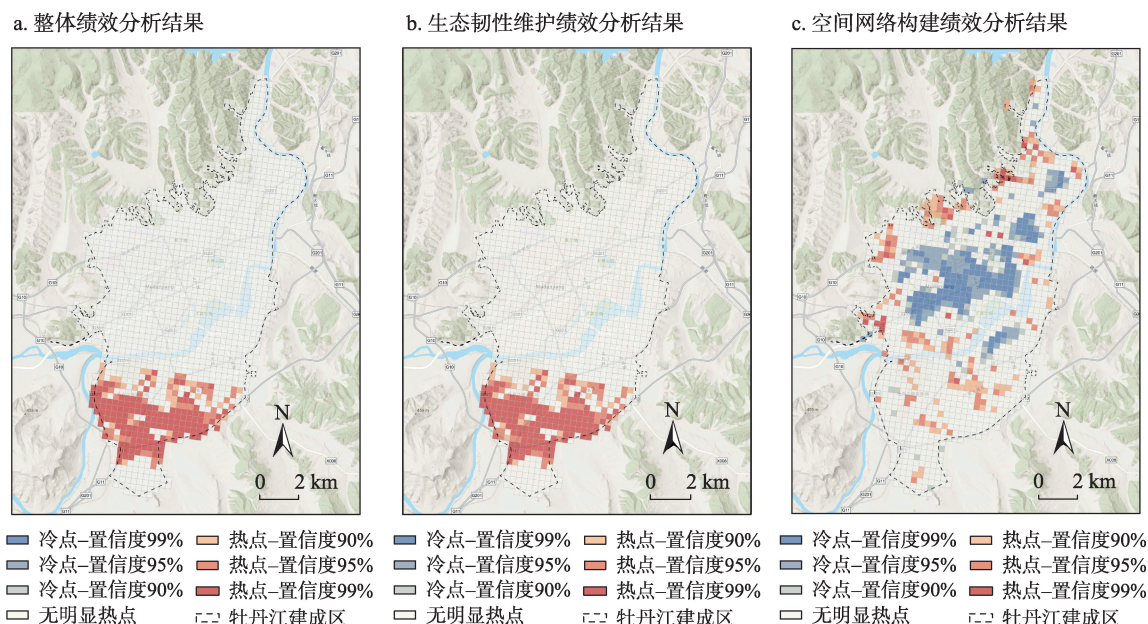
Figure 8 Results of Anselin Local Moran's *I* analysis of overall green infrastructure performance

值为相对低值。农田因规模较大,形态规整,绩效值相对较高,分别形成了农田的绩效高值聚集和农田的绩效高值包围其他绿色基础设施的绩效低值的现象。与此同时,南部非农田的绿色基础设施绩效和农田绩效的关系以聚集为主,负相关性和无显著相关性较少,说明农田对构建空间网络的促进作用大于非农田的绿色基础设施对农田景观廊道连通的拮抗作用。此外,绿色基础设施整体绩效值在建成区中部无显著的空间相关性;但在北部有低值聚集现象,且聚集区域的*p*值和*z*得分互不对应,进一步验证非农田基础设施因规模较小和分布分散,绩效值相对较低。因此,增加农业景观面积可较大幅度提升绿色基础设施绩效。中部和北部无绿色基础设施绩效高值聚集的结果验证了非农田的绿色基础设施对绿色基础设施的空间网络连通性有

一定拮抗作用,因此,将低效工业用地转换为非农业景观时,需要考虑低效工业用地周边的绿色基础设施类型以及两者距离。Getis-Ord G_i^* 分析结果表明,绿色基础设施的整体绩效和生态韧性维护绩效均以高值聚集分布为主(图9),高值主要分布在农田区域;空间网络构建绩效在中偏北部有较为集中的低值聚集,相应区域是客流量较大的城市街区和滨江地段,在非农田的绿色基础设施地带有高值聚集,但这些绿色基础设施分布相对分散,致使空间网络构建绩效的高值聚集程度较低。这表明增加农业景观可高效提升生态韧性维护绩效,且对绿色基础设施整体绩效提升有较大的促进作用;增加非农业景观的绿色基础设施的面积占比和分布密度可提升建成区整体的空间网络构建绩效。

(2)牡丹江建成区低效工业用地转换机制

2024年2月

图9 绿色基础设施整体绩效Getis-Ord G_i^* 分析结果Figure 9 Results of Getis-Ord G_i^* analysis of overall green infrastructure performance

注:置信度90%说明具有相关性;置信度95%说明具有显著的相关性;置信度99%说明具有非常显著的相关性。

根据工业门类,选择落后淘汰和限制发展的低效工业用地进行优化利用,并基于绿色基础设施绩效的现状评估和空间相关性分析,构建牡丹江建成区低效工业用地转换机制。

根据空间统计分析结论,南部与北部绿色基础设施绩效分布情况具有一定差异,为充分发挥低效工业用地价值,需分区域进行转换。建成区南部的低效工业用地转换包括两部分:①为了生态韧性维护绩效提升,可以将南部无污染的低效工业用地转换为农业景观,既满足农业景观的建设条件,保证基本的粮食安全,又可结合农产品丰富的类型,因地制宜地为低效工业用地选择适宜的农作物类型和种植方式。②为了空间网络构建绩效提升,可将南部非农业景观绿色基础设施周边的低效工业用地优先转换,其中,对于污染程度达到峰值的低效工业用地,优先转换为林地景观,以增强环境恢复力;对于污染程度未达峰值的低效工业用地分为两种转换情况,如果周边有除农田和水域外的两类及以上的非农业景观绿色基础设施时,根据各类绿色基础设施的土壤保持能力,优先转换为灌木地;如果没有,则转换为最邻近的非农业景观绿色基础设施类型。

建成区北部的行政地域边界具有绿色基础设

施向城市建设用地渗透的需求。基于城市活动和蓝绿空间底线的考虑,北部的低效工业用地优先考虑转换为最邻近的非农业景观和水域的绿色基础设施类型。另外,对低效工业用地的绿化覆盖率结果采用自然断点法加以划分,选取绿化覆盖率等级最高的低效工业用地,将其转化为草地。

4.4 低效工业用地优化利用模拟结果

经优化利用模拟,具有绿色基础设施转换条件的低效工业用地面积为 303.80 hm^2 , 占低效工业用地面积的 67.92%。通过绿色基础设施转换,改变了先前整体绩效南高北低的极端特征,建成区中部和北部沿着牡丹江水域和建成区行政地域边界形成了带状的绩效高值,南部农田带来的绩效又通过乔木等绿色基础设施在空间上与牡丹江水域绩效有所联系,强化了建成区整体绩效南北空间之间的关联性(图 10)。优化模拟后的绿色基础设施整体绩效提升了 10.18%,其中,生态韧性维护绩效提升了 10.17%,空间网络构建绩效提升了 248.14%。优化利用后,人均绿色基础设施绩效服务水平显著提升,整体绩效服务水平提升了 1322.13%,生态韧性维护绩效服务水平提升了 1324.57%,空间网络构建绩效服务水平提升了 114.59%。人口收缩对绿色基础设施的整体绩效服务水平的影响也有所提升(图 11)。

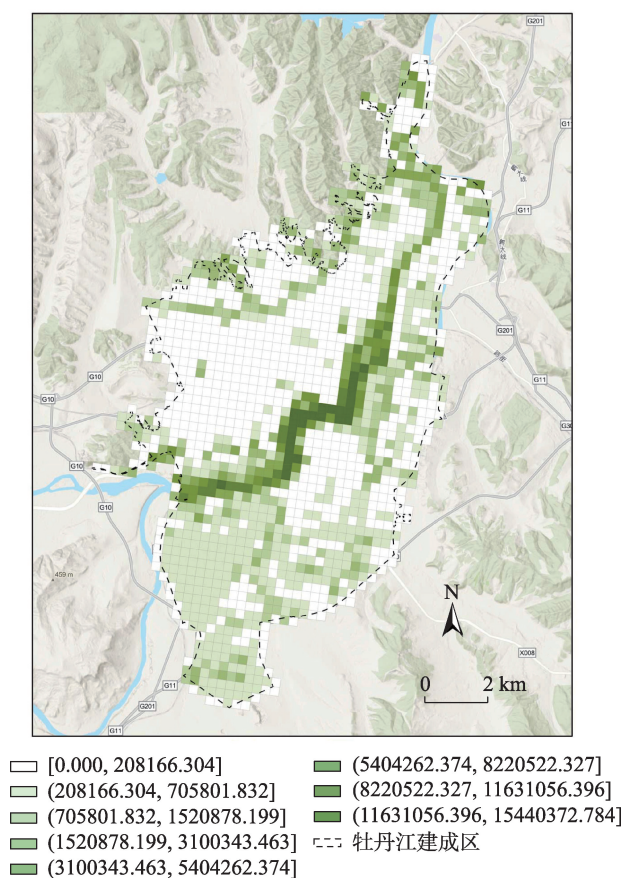


图10 绿色基础设施整体绩效优化利用结果

Figure 10 Optimized utilization results of overall green infrastructure performance

模拟结果表明,本文提出的低效工业用地转换机制对牡丹江市的规划实践具有一定参考价值。不仅高效利用了低效工业用地,完善了城市绿色基础设施,提升了牡丹江城市空间品质,还经过多方权衡,从绿色基础设施绩效整体发展的角度对牡丹江市的城市绿化景观设计、城镇低效用地转换、城乡用地补偿等方面提出相关参考依据。

5 讨论、结论与展望

5.1 讨论

结合国际经验来看,收缩城市低效工业用地大多处于空置或土地利用效率低下、高污染、高能耗、低效益等状态^[8-10]。在增长型城市中,这些低效工业用地并不一定会对城市社会经济发展造成较大影响,政府可以借助市场力量,引入新的企业来对低效空间更新改善。但是在收缩城市中,由于城市经济下行,市场往往不愿轻易介入低效工业用地再利用项目,政府又难以独自负担低效工业用地治理费

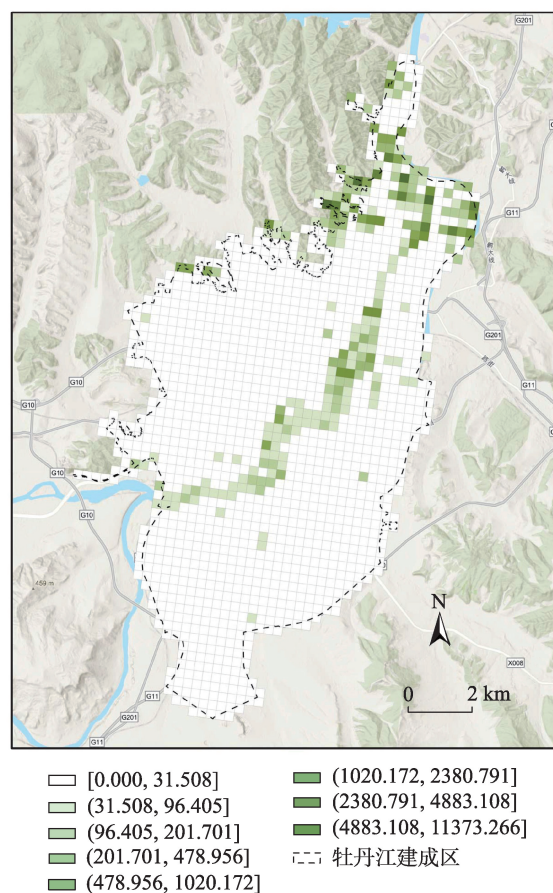


图11 人均绩效服务水平优化利用结果

Figure 11 Optimized utilization results of per capita service performance levels

用,低效工业用地再开发难度相对较大,给城市形象带来消极影响,甚至会进一步加剧城市收缩进程^[4]。绿色基础设施的建设可作为一种提高城市社会经济效益与韧性的规划手段,将低效工业用地转换为绿色基础设施可以有效缓解上述问题,激活用地的社会、经济价值,使空置或低效用地成为城市发展资源^[22,23],改善城市绿色空间网络和自然生态系统,提高空间环境品质。这与本文模拟牡丹江建成区低效工业用地在转换为绿色基础设施后所产生的收益结果一致,转换了303.80 hm²低效工业用地,改变了先前绿色基础设施整体绩效南高北低的极端的特征,使整体绩效服务水平提升了1322.13%。

收缩城市低效工业用地转换为绿色基础设施的路径需要与城市发展内在需求和逻辑相结合。在人口不断减少的过程中,人地关系发展面临矛盾,一方面,绿色基础设施的建设需要以提高城市

2024年2月

生态韧性维护为主,应对空间资源失配、生态系统失衡、社会经济发展下行等问题;另一方面,需要优化绿色基础设施空间网络构建格局,提高城市环境品质,实现城市“小而美”的愿景。收缩城市的绿色基础设施建设需要从这两个方面入手,结合本文来看,在收缩城市中增加类似农田类型的农业景观可高效提升生态韧性维护绩效,且对绿色基础设施整体绩效提升有较大的促进作用;增加非农业景观的绿色基础设施的面积占比和分布密度可提升建成区整体的空间网络构建绩效。

收缩城市需要以“低成本、高收益”的思路展开低效工业用地的转换,为了显著提升低效工业用地

的效率和质量,确保收缩城市绿色基础设施建设可以得到有效实施^[21,23],可结合收缩城市空间和生态特征,在分别构建低效工业识别体系与绿色基础设施绩效评估体系并评估现状的基础上,借助决策树模型,建构基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地转换机制(图12)。具体来说,结合收缩城市绿色基础设施绩效空间分布情况,可以划分为3种转换路径:①基于国土空间规划划定的农业空间和蓝绿空间范围,在空间上织补对应范围内相应的绿色基础设施,在面积上确定两个空间被城市建设用地合理占用的部分是否可以以就近原则取周边低效工业用地进行用地补偿。②在非农业空

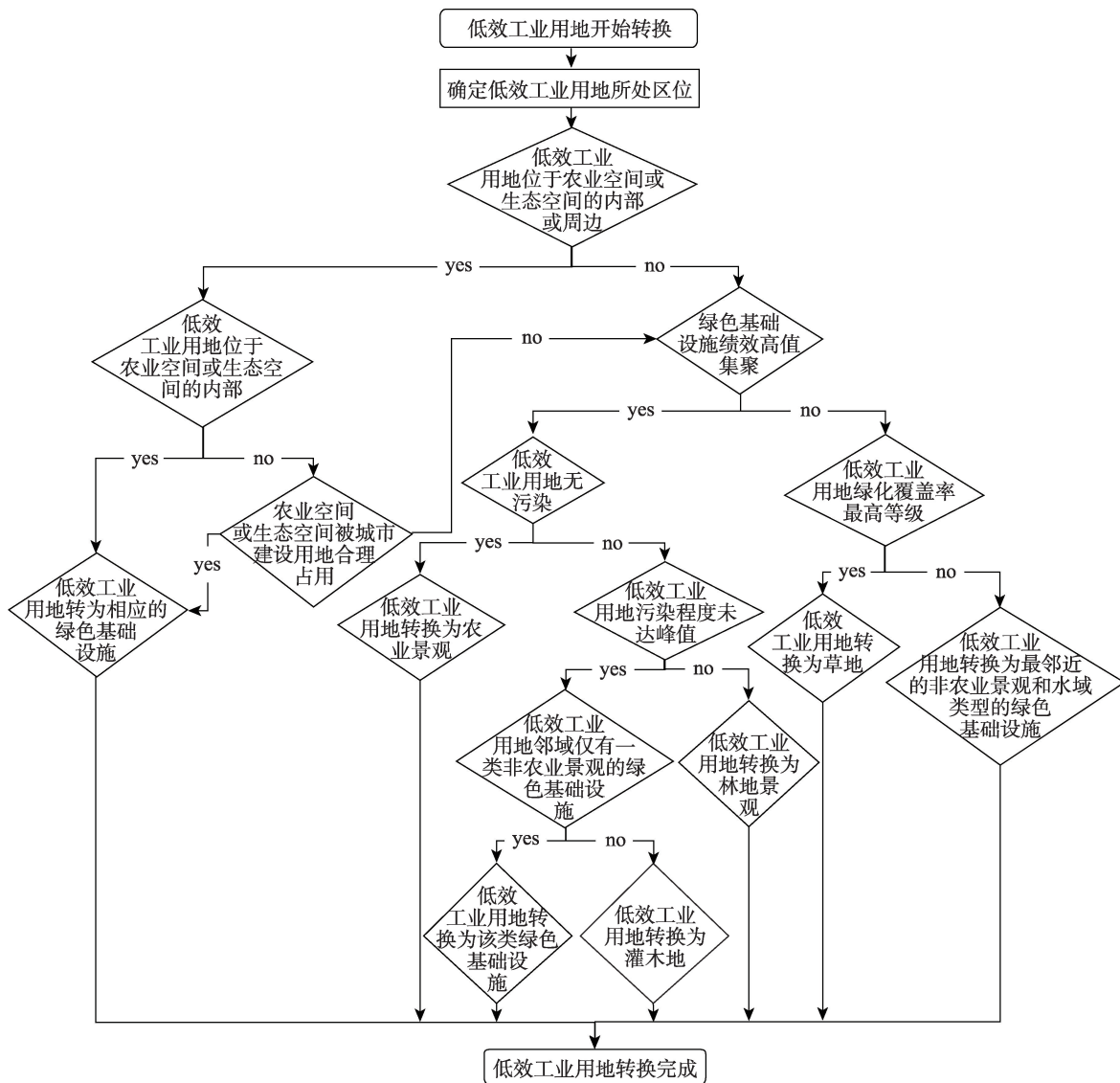


图12 基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地转换机制

Figure 12 Conversion mechanism of low-efficiency industrial land in shrinking cities based on green infrastructure performance improvement

间和蓝绿空间范围内的绿色基础设施绩效高值集聚地区,结合收缩城市低效工业用地污染程度特征来判断转换的绿色基础设施类型:无污染的低效工业用地可以转换为农业景观,提升收缩城市绿色基础设施的生态韧性;有污染的低效工业用地需对环境污染程度进行判断,污染程度达到峰值的低效工业用地优先转换为林地景观;未达峰值的低效工业用地需要探讨周边非农业景观的绿色基础设施的数量,当周边有两类及以上的非农业景观的绿色基础设施时,低效工业用地需要根据绿色基础设施的土壤保持能力优先转换为灌木地,反之优先选择转换为最邻近的非农业景观的绿色基础设施类型。

③在非农业空间和蓝绿空间范围内的绿色基础设施绩效低值集聚地区,可以通过探讨低效工业用地的绿化覆盖率来判断转换类型,绿化覆盖率较高地区可以优先转换为草地,反之可以转换为邻近的非农业景观和水域类型的绿色基础设施。通过上述转换机制可以有效提高收缩城市的生态韧性,完善城市绿色基础设施空间网络,从而优化收缩城市空间环境。

5.2 结论

本文以典型收缩城市牡丹江建成区的低效工业用地为研究对象,针对收缩城市如何利用绿色基础设施进行空间优化展开系统性的研究。在利用层次分析法构建低效工业用地识别体系和绿色基础设施绩效评估体系的基础上,通过TOPSIS法定量识别牡丹江建成区低效工业用地绩效,采用ESV修正系数法和Fragstats工具定量评估了绿色基础设施绩效,并建立基于绿色基础设施绩效提升的低效工业用地转换机制,为收缩城市低效工业用地优化利用路径提供科学参考依据。主要结论如下:

(1)借鉴国内外相关研究现状,通过融合不同理论背景低效工业用地及绿色基础设施评估体系,结合中国收缩城市特征,分别从土地利用、开发情况、空间环境3个方面以及生态韧性维护和空间网络构建两个维度,建立了低效工业用地识别和绿色基础设施绩效评估判断矩阵。

(2)根据评估体系,以牡丹江建成区为例,全面识别了低效工业用地,牡丹江建成区共有160块用地处于低效利用状态,占工业用地总数量的

45.71%,面积为447.30 hm²,低效占比较高,牡丹江工业低效用地亟需得到合理利用。系统评价牡丹江建成区内绿色基础设施状况,得出牡丹江建成区总面积为11736.81 hm²,建成区内绿色基础设施面积共有4950.37 hm²,占建成区面积的42.18%,分布情况从南至北递减,整体绩效呈现“南高北低”的特征,研究区域南部绿色基础设施空间网络结构系统性强,北部的绿色基础设施规模较少,但形态和类型丰富,具有形成城市景观廊道的潜力。

(3)借助空间统计分析法建立基于绿色基础设施绩效提升的低效工业用地优化利用模型,模拟发现,具有绿色基础设施转换条件的低效工业用地面积为303.80 hm²,占低效工业用地面积的67.92%。转化后改变了先前绿色基础设施整体绩效“南高北低”的极端特征,强化了整体绩效的南北空间之间的相关性。优化模拟利用后的绿色基础设施整体绩效提升了10.18%,其中,生态韧性维护绩效提升了10.17%,空间网络构建绩效提升了248.14%。

5.3 研究局限与展望

本文的低效工业用地优化模拟结果显示牡丹江的低效工业用地转换机制具有理论可行性,但实现低效工业用地可持续的优化利用规划和监督管理,以下内容仍需进一步探讨:

(1)本文从收缩城市及生态优化视角出发,提出的优化利用路径主要围绕着绿色基础设施转化展开,但低效工业用地转换为绿色基础设施并非最优解或唯一解,亦可转换为其他功能用地从而发挥最大效益,未来研究仍需对低效工业用地特征与产生机理深入分析,以此建构其他功能的转换路径。

(2)本文从规划师的角度,提出的收缩城市低效工业用地再利用策略侧重于国土空间规划中对用地结构与功能的优化。但在实际实施过程中,还需对低效工业用地优化利用的更新与运营模式展开研究,构建多方合作的低效工业用地再利用模式,才能建立低效工业用地可持续优化利用机制。

(3)受数据可获取性、实地调研的可开展性限制,本文的研究区域主要集聚在牡丹江市区的主要建成区,建成区周边绿色基础设施未被划入研究范围之中,同时受牡丹江建成区北部老城区与南部新城的空间形态布局等因素干扰,在一定程度上会对

2024年2月

绿色基础设施绩效评价结果产生影响。

参考文献(References):

- [1] 孟谦, 吴雅馨, 吴军. 广州市村级工业园存量工业用地临时更新路径重构[J]. 规划师, 2022, 38(7): 100–108. [Meng Q, Wu Y X, Wu J. Exploring temporary regeneration path for stock industrial land of village-level industrial park in Guangzhou[J]. Planners, 2022, 38(7): 100–108.]
- [2] 谷晓坤, 周小平, 刘博研, 等. 基于“情境-结构-行为-结果”分析的上海市低效工业用地减量化治理[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1413–1424. [Gu X K, Zhou X P, Liu B Y, et al. Using “Situation-Structure-Implementation-Outcome” framework to analyze the reduction governance of the inefficient industrial land in Shanghai[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1413–1424.]
- [3] Alfonso L E, Antonio J G, María J M. What is happening in shrinking medium-sized cities? A correlational analysis and a multiple linear regression model on the case of Spain[J]. Cities, 2023, DOI: 10.1016/j.cities.2023.104205.
- [4] 衣霄翔, 赵天宇, 吴彦锋, 等. “危机”抑或“契机”? 应对收缩城市空置问题的国际经验研究[J]. 城市规划学刊, 2020, (2): 95–101. [Yi X X, Zhao T Y, Wu Y F, et al. “Crisis” or “opportunity”? International experiences in dealing with vacancy in shrinking cities[J]. Urban Planning Forum, 2020, (2): 95–101.]
- [5] 甄溪, 李津莉, 于红, 等. 存量规划背景下低效工业用地识别与优化策略研究: 以聊城城市嘉明经济开发区为例[J]. 天津城建大学学报, 2023, 29(5): 311–318. [Zhen X, Li J L, Yu H, et al. Research on identification and optimization strategy of inefficient industrial land under the background of stock planning: Taking Jiaming economic development zone of Liaocheng City as an example[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2023, 29(5): 311–318.]
- [6] Koroso N H, Zevenbergen J A, Lengoiboni M. Urban land use efficiency in Ethiopia: An assessment of urban land use sustainability in Addis Ababa[J]. 2020, DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105081.
- [7] 荆莹. 收缩城市建成区低效工业用地识别与优化策略研究: 以齐齐哈尔市为例[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. [Jing Y. Identification and Optimization Strategy for Inefficient Industrial Land in Urban Built-Up Area of Shrinking City[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.]
- [8] 甄延临, 瞿嗣澄, 陈玉洁. 节约集约背景下城市低效工业用地的更新路径与机制研究: 以嘉兴市城北片区为例[J]. 城市发展研究, 2023, 30(11): 9–15. [Zhen Y L, Qu S C, Chen Y J. Research on the renewal path and mechanism of urban inefficient industrial land under the background of economization and intensification: Taking the Chengbei District of Jiaxing City as an example[J]. Urban Development Studies, 2023, 30(11): 9–15.]
- [9] Lee J, Newman G. Forecasting urban vacancy dynamics in a shrinking city: A land transformation model[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, DOI: 10.3390/ijgi6040124.
- [10] 蔡立珏, 何继红, 梁雄飞, 等. 存量低效工业园区改造全周期监管策略: 以佛山市顺德区村级工业园升级改造实践为例[J]. 规划师, 2021, 37(6): 45–49. [Cai L F, He J H, Liang X F, et al. Full cycle monitoring of low efficiency industrial park renovation: Shunde practice[J]. Planners, 2021, 37(6): 45–49.]
- [11] Lester T W, Kaza N, Kirk S. Making room for manufacturing: Understanding industrial land conversion in cities[J]. Journal of the American Planning Association, 2013, DOI: 10.1080/01944363.2014.915369.
- [12] Elliott J R, Frickel S. Environmental dimensions of urban change: Uncovering relict industrial waste sites and subsequent land use conversions in Portland and New Orleans[J]. Journal of Urban Affairs, 2011, 33(1): 61–82.
- [13] Frickel S, Elliott J R. Tracking industrial land use conversions: A new approach for studying relict waste and urban development[J]. Organization & Environment, 2008, 21(2): 128–147.
- [14] Sloan S, Locatelli B, Wooster M, et al. Fire activity in Borneo driven by industrial land conversion and drought during El Niño periods, 1982–2010[J]. Global Environmental Change, 2017, 47: 95–109.
- [15] 赖焱, 吴远翔. 东北老工业城市低效工业用地再开发研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(12): 1–4. [Lai Y, Wu Y X. Research on the redevelopment of inefficient industrial land under the assessment of economic inefficiency and ecological needs[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2023, 45(12): 1–4.]
- [16] 陈晨, 宫远山, 王磊, 等. 遗产保护语境下工业遗产低效用地更新模式探索: 以沈阳东贸库厂区为例[J]. 上海城市规划, 2023, (5): 119–125. [Chen C, Gong Y S, Wang L, et al. Exploration on renewal mode of inefficient land use for industrial heritage in the context of heritage protection: A case study of Dongmaoku factory in Shenyang[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023, (5): 119–125.]
- [17] 黄敏强. 存量低效工业用地改造提升策略研究: 以A片区为例[J]. 中国住宅设施, 2023, (12): 46–48. [Huang M Q. A study on the strategy for upgrading and upgrading low efficiency industrial land in existing stocks: Taking area A as an example[J]. China Housing Facilities, 2023, (12): 46–48.]
- [18] 朱乾隆, 马贤磊, 石晓平, 等. 差别化城镇土地使用税政策对工业用地利用效率的影响[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 250–263. [Zhu Q L, Ma X L, Shi X P, et al. Impact of differentiated urban land use tax policy on the efficiency of industrial land use[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 250–263.]
- [19] Schilling J, Logan J. Greening the rust belt: A green infrastructure model for right sizing America’s shrinking cities[J]. Journal of the

- American Planning Association, 2008, DOI: 10.1080/01944360802354956.
- [20] 魏新星, 陈一欣, 黄静, 等. 城市低效用地更新为绿色基础设施优先度评价[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6565–6578. [Wei X X, Chen Y X, Huang J, et al. Priority evaluation of urban inefficient land renewal to green infrastructure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022 42(16): 6565–6578.]
- [21] Olic P, Stober D. Urban green infrastructure for shrinking city: Case study—city of Osijek[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/471/10/102025.
- [22] 张恩嘉, 雷链, 孟祥凤, 等. 中国收缩城市的设计应对策略探索: 以鹤岗工作坊为例[J]. 城市与区域规划研究, 2021, 13(1): 168–186. [Zhang E J, Lei L, Meng X F, et al. Urban design strategies for shrinking cities in China: A case study of Hegang design studio [J]. *Journal of Urban and Regional Planning*, 2021, 13(1): 168–186.]
- [23] 马爽, 龙瀛. 基于绿色基础设施的中国收缩城市正确规模模型[J]. 西部人居环境学刊, 2018, 33(3): 1–8. [Ma S, Long Y. The right-sizing model in Chinese shrinking cities based on green infrastructure[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2018, 33(3): 1–8.]
- [24] Németh J, Hollander J. Right-sizing shrinking cities: A landscape and design strategy for abandoned properties[J]. *Journal of Landscape Architecture*, 2016, 11(2): 90–100.
- [25] Kim G. The public value of urban vacant land: Social responses and ecological value[J]. *Sustainability*, 2016, DOI: 10.3390/su8050486.
- [26] Sonia H, Robert B. Must shrinking cities be distressed cities? A historical and conceptual critique[J]. *International Planning Studies*, 2021, 26(1): 1–13.
- [27] Kim G, Newman G, Jiang B. Urban regeneration: Community engagement process for vacant land in declining cities[J]. *Cities*, 2020, DOI: 10.1016/j.cities.2020.102730.
- [28] 麻学锋, 胡双林. 旅游城市韧性与居民幸福水平时空适配特征及影响因素: 以张家界为例[J]. 资源科学, 2022, 44(11): 2373–2385. [Ma X F, Hu S L. Spatiotemporal adaptation characteristics and influencing factors of tourism city resilience and residents' happiness level: Taking Zhangjiajie City as an example[J]. *Resources Science*, 2022, 44(11): 2373–2385.]
- [29] 景涛, 刘玉亭, 程娟. 小城镇工业用地空间绩效研究: 以中山XL镇为例[J]. 小城镇建设, 2019, 37(8): 27–35. [Jing T, Liu Y T, Cheng J. The spatial performance of industrial land in small towns: A case study of XL town in Zhongshan City[J]. *Development of Small Cities & Towns*, 2019, 37(8): 27–35.]
- [30] 千年生态系统评估: 生态系统与人类福祉: 综合报告[R/OL]. (2005–03–23) [2024–02–23]. <https://www.millenniumassessment.org/zh/Synthesis.html>. [One Thousand Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: Comprehensive Report[R/OL]. (2005–03–23) [2024–02–23]. <https://www.millenniumassessment.org/zh/Synthesis.html>.]
- [31] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.08.022.
- [32] Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, et al. Relationships between land cover and the surface urban heat island: Seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures[J]. *Landscape Ecology*, 2014, DOI: 10.1007/s10980-013-9950-5.
- [33] 李仕冀, 李秀彬, 谈明洪. 乡村人口迁出对生态脆弱地区植被覆被的影响: 以内蒙古自治区为例[J]. 地理学报, 2015, 70(10): 1622–1631. [Li S J, Li X B, Tan M H. Impacts of rural-urban migration on vegetation cover in eco-logically fragile areas: Taking Inner Mongolia as a case[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1622–1631.]
- [34] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001, (6): 5–9. [Xie G D, Lu C X, Cheng S K. Progress in evaluating the global ecosystem services[J]. *Resources Science*, 2001, (6): 5–9.]
- [35] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243–1254. [Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.]
- [36] Costanza R, de Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253–260.
- [37] 李依汶, 林涛, 周文强, 等. 基于多情景模拟的洞庭湖流域生态系统服务价值研究[J/OL]. 中国农业资源与区划, (2024–01–31) [2024–02–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240130.1603.020.html>. [Li Y W, Lin T, Zhou W Q, et al. Analysis of ecosystem service value with multi-scenario simulation in Dongting Lake Basin[J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, (2024–01–31) [2024–02–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240130.1603.020.html>.]
- [38] 许海英, 杨超, 李清泉. 三江源国家公园生态系统服务价值的时空演变[J/OL]. 生态学杂志, (2024–01–25) [2024–02–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240124.1754.010.html>. [Xu H Y, Yang C, Li Q Q. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value in Sanjiangyuan National Park[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, (2024–01–25) [2024–02–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240124.1754.010.html>.]

2024年2月

- [39] 王瑞祥, 叶青, 郭晓佳. 福州都市圈生态系统服务价值时空演变及生态-经济协调发展[J/OL]. 地球科学与环境学报, (2024-01-31) [2024-02-23]. <https://doi.org/10.19814/j.jese.2023.11005>. [Wang R X, Ye Q, Guo X J. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value and the eco-economic harmonious development in Fuzhou Metropolitan Area, China[J/OL]. Journal of Earth Sciences and Environment, (2024-01-31) [2024-02-23]. <https://doi.org/10.19814/j.jese.2023.11005>.]
- [40] 黄贞斌, 李红波. 武汉城市圈土地利用及生态系统服务价值时空演变多情景模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(12): 2542-2557. [Huang Z B, Li H B. Multi-scenario simulation of spatial-temporal evolution of land uses and ecosystem service value in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(12): 2542-2557.]
- [41] Su S L, Xiao R, Jiang Z L, 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.
- [42] 郭思岩, 侯艳丽, 石斌. 过去40年兰州市榆中县土地利用景观格局变化及驱动力分析[J]. 国土与自然资源研究, 2024, (2): 20-26. [Guo S Y, Hou Y L, Shi B. Analysis of land use landscape pattern changes and driving forces in Yuzhong County, Lanzhou City in the past 40 years[J]. Territory & Natural Resources Study, 2024, (2): 20-26.]
- [43] 李辉, 王福海, 张晓媛, 等. 基于BP神经网络的山地城市景观格局时空特征分析[J]. 农业与技术, 2024, 44(2): 107-112. [Li H, Wang F H, Zhang X Y, et al. Spatial and temporal characteristics of mountain urban landscape pattern based on BP neural network [J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(2): 107-112.]
- [44] 范育蕾, 夏哲一, 魏雪, 等. 四个时期长江经济带湿地生态系统服务对景观格局响应研究[J]. 湿地科学, 2024, 22(1): 139-147. [Fan Y L, Xia Z Y, Wei X, et al. The response of wetland ecosystem services to landscape pattern of the Yangtze River Economic Belt during four periods[J]. Wetland Science, 2024, 22(1): 139-147.]
- [45] 北京市人民政府. 关于印发《关于“十四五”时期深化推进“疏解整治促提升”专项行动的实施意见》的通知[EB/OL]. (2021-02-05) [2024-02-23]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zfwj/202102/t20210205_2277859.html. [The People's Government of Beijing Municipality. Notice on Issuing the Implementation Opinions on Deepening and Promoting the Special Action of Dredging and Improving during the 14th Five-Year Plan Period[EB/OL]. (2021-02-05) [2024-02-23]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zfwj/202102/t20210205_2277859.html.]
- [46] Wang K, Li Z Y, Zhang J J, et al. Built-up land expansion and its impacts on optimizing green infrastructure networks in a resource-dependent city[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102026.
- [47] Laforteza R, Sanesi G, Pace B, et al. Planning for the rehabilitation of brownfield sites: A landscape ecological perspective[J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2004, DOI: 10.2495/BF040031.
- [48] Belmeziti A, Cherqui F, Kaufmann B. Improving the multi-functionality of urban green spaces: Relations between components of green spaces and urban services[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, DOI: 10.1016/j.scs.2018.07.014.
- [49] Fragstat. FRAGSTATS 4 Tutorial[EB/OL]. (1995-01-01) [2024-02-23]. <https://fragstats.org/index.php/tutorial>.
- [50] WorldPop. Open Spatial Demographic Data and Research[EB/OL]. (2013-10-01) [2024-02-23]. <https://www.worldpop.org/>.

Optimal utilization of low-efficiency industrial land in shrinking cities based on green infrastructure performance improvement: Take Mudanjiang as an example

LIU Yibo^{1,2}, ZHANG Haoping^{1,2}, WU Zirong^{1,2}, XIA Lei^{1,2}

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of National Territory Spatial Planning and Ecological Restoration in Cold Regions, Ministry of Natural Resources, Harbin 150001, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this paper is to systematically explore the optimized conversion paths and mechanisms between shrinking urban inefficient industrial land and green infrastructure, and to provide a reference for the intensive and efficient use of shrinking urban inefficient industrial land in China. [Methods] Taking Mudanjiang City, a typical shrinking city, as an example, this study selected the relevant data in 2021 and constructed an identification indicator system of inefficient industrial land use and a performance assessment indicator system of green infrastructure by analytic hierarchical process (AHP) analysis. It used the TOPSIS method for the quantitative evaluation of inefficient industrial land use, and used the ecosystem service value (ESV) correction coefficient method and Fragstats tool for the quantitative evaluation of green infrastructure performance. An optimization model of low-efficiency industrial land based on the performance improvement of green infrastructure was established, and the conversion mechanism of low-efficiency industrial land to green infrastructure was further revealed. [Results] (1) There are 160 land parcels in the state of inefficient utilization in the built-up area of Mudanjiang City (447.30 hm² in total), accounting for 45.71% of the total number of industrial sites, while green infrastructure is 4950.37 hm², accounting for 42.18% of the built-up area of the city, with the distribution decreasing from south to north. (2) With the help of the optimal utilization model of inefficient industrial land based on green infrastructure performance improvement, it was found that 303.80 hm² of inefficient industrial land in Mudanjiang could be converted into green infrastructure. (3) After optimization simulation, 67.92% of in the low-efficiency industrial land is converted to green infrastructure, which leads to 10.18% improvement in the overall performance of green infrastructure. [Conclusion] Using the case of Mudanjiang City, it was empirically demonstrated that the conversion mechanism of low-efficiency industrial land in shrinking cities based on the improvement of green infrastructure performance can prevent inefficient industrial land use and improve the overall performance of green infrastructure. By preventing inefficient industrial land use from further negatively affecting urban development, it can promote the high-quality development of shrinking cities through “exchanging stock for increment”, and provide a reference for research related to the spatial optimization of shrinking cities.

Key words: shrinking cities; inefficient industrial land; green infrastructure; assessment system; optimal utilization; Mudanjiang City