doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.059

昆明市土地利用多功能权衡/协同效应及其驱动机制研究

陈国平[1]　张丹丹[1]　李　坤[1]　赵俊三[1]　杨海波[1,2]

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;2.昆明理工大学津桥学院,昆明 650106)

摘要:探索土地利用功能(Land use functions,LUFs)间的权衡/协同效应及其空间非平稳性和驱动机制,对有效缓解人地矛盾、提升区域国土空间总体效益具有重要意义。现有研究多从宏观尺度探讨土地利用功能间权衡/协同效应的时空分布格局与影响因素,但难以真实反映人地关系地域系统的复杂性及内在机制。本文以昆明市为例,基于网格尺度采用地理加权回归(GWR)揭示 2000—2020 年昆明市土地利用功能权衡/协同效应的空间异质性;运用地理探测器模型和多尺度地理加权回归模型(MGWR)深入探析"自然-社会-经济"因素对土地利用功能间权衡/协同效应的作用机制。结果表明:土地利用功能间权衡/协同效应呈显著的空间异质性,生态功能与生产功能、生活功能与生产功能呈倒"U"形凹函数分布,并存在边界效应,而生态功能与生活功能呈"U"形凸函数分布。在"自然-经济-社会"因素中,降水量、高程、坡度、与市中心距离、与县中心距离、土地利用程度和人类活动强度是影响昆明市土地利用功能权衡/协同效应的主导因素。土地利用功能间权衡/协同效应与主导因素的空间异质性呈显著关系,降水量对生态功能与生产功能的权衡效应具有负向影响,与市中心距离、与县中心距离、高程和坡度则呈正向影响;与市中心距离对生态功能与生活功能的权衡效应具有负向影响,高程、土地利用强度、坡度和人类活动强度呈正向影响;与市中心距离、降水量和高程对生活功能与生产功能的权衡效应主要呈负向影响,与县中心距离和坡度呈正向影响。研究结果有助于更深入地理解土地利用功能系统的内在机制,为土地资源的多功能开发、合理利用及科学管理提供理论依据和技术支持。

关键词:土地利用功能;权衡/协同;驱动机制;空间非平稳性;昆明市

中图分类号:X171.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0648-14　　**OSID**:

Trade-offs/Synergies of Multi-functional Land Use and Their Driving Mechanisms in Kunming City

CHEN Guoping[1]　ZHANG Dandan[1]　LI Kun[1]　ZHAO Junsan[1]　YANG Haibo[1,2]

(1. *Faculty of Land Resources Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *China*
2. *Kunming University of Science and Technology Oxbridge College*, *Kunming* 650106, *China*)

Abstract: Exploring the trade-offs/synergies between land use functions (LUFs), their spatial non-stationarity, and driving mechanisms is of great significance for effectively alleviating the human-environment conflict and enhancing the overall spatial benefits of territorial space. Existing studies mainly focus on the macro scale to investigate the spatiotemporal distribution patterns and influencing factors of trade-offs/synergies between land use functions, but they failed to accurately reflect the complexity and underlying mechanisms of the human-environment relationship system. Kunming City was selected as an example. Firstly, geographic weighted regression (GWR) and constrained line methods were applied at the grid scale to examine the spatial heterogeneity and nonlinear characteristics of LUF trade-offs/synergies in Kunming City from 2000 to 2020. Then geographic detector models and multi-scale geographic weighted regression models (MGWR) were applied to further analyze the driving mechanisms

收稿日期:2025-01-14　修回日期:2025-03-15

基金项目:地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合基金项目(2024-04-14)、昆明理工大学校人培基金项目(KKZ3202421124)、云南省高校自然资源空间信息集成与应用科技创新团队项目(2019-15)和云金地青年科研基金项目(2024-02)

作者简介:陈国平(1981—),男,副教授,主要从事国土空间规划与 GIS 时空建模研究,E-mail:chenguoping@kust.edu.cn

通信作者:杨海波(1987—),男,副教授,主要从事土地利用规划与信息化研究,E-mail:20191101020@stu.kust.edu.cn

of the "natural – social – economic" factors on the LUF trade-offs/synergies. The results showed that significant spatial heterogeneity was observed in LUF trade-offs/synergies. The interaction between ecological function (EF) and production function (PF), as well as between living function (LF) and PF, showed an inverted "U"-shaped concave function with evident boundary effects. The interaction between EF and LF displayed a "U"-shaped convex trade-offs pattern. Among the "natural – social – economic" factors, precipitation, elevation, slope, distance to the city center, distance to the county center, land use degree, and human activity intensity were the dominant factors influencing the LUF trade-offs/synergies in Kunming City. The LUF trade-offs/synergie and the dominant factors showed significant spatial heterogeneity. Precipitation negatively affected the trade-off effect between EF and PF, while distance to city center, distance to county center, elevation, and slope showed positive effects; distance to city center negatively affected the trade-off effect between EF and LF, while elevation, land use degree, slope, and human activity intensity showed positive effects; distance to city center, precipitation, and elevation primarily negatively affected the trade-off effect between LF and PF, while distance to county center and slope had positive effects. The research findings contributed to a deeper and more refined understanding of the internal mechanisms of the land use function system and provided theoretical and technical support for multifunctional land resource development, rational utilization, and scientific management.

Key words: land use functions; trade-offs/synergies; driving mechanisms; spatial non-stationarity; Kunming City

0　引言

土地利用功能是指土地利用系统通过不同方式直接或间接提供人类生存和发展的物质产品与服务的能力[1]。作为人地关系地域系统的组成部分,土地利用功能的合理配置与优化利用是推动人地关系协调发展的基础[2]。过去几十年来,以经济发展为核心的国土空间开发模式加剧了土地资源稀缺性与多功能性间的冲突,工业化和城镇化的高速发展导致了国土空间结构失衡、布局混乱和功能低效等问题,人地关系的矛盾愈发突出[3]。在新一轮国土空间规划体系重构背景下,注重"以人为本"的农业、城镇和生态空间相互协调的国土空间发展模式已成为新的研究热点[4]。国土空间由不同土地利用功能组合而成,其结构和功能深受各功能间相互作用关系演变的影响[5]。因此,揭示土地利用功能间的相互作用关系,评估其对"自然-社会-经济"因素的非线性响应及阈值效应,对提升国土空间的综合利用效益具有重要意义。

由于人类对土地资源开发利用的多样性与差异性,不同土地利用功能的发展方向和强度存在显著差异,这直接导致各功能间的相互作用呈现多种形式,主要表现为此消彼长的权衡关系以及同步增长或下降的协同关系[6]。土地资源有限性与人类需求无限性间的摩擦,导致土地利用功能间的权衡/协同关系逐渐增强,人地关系冲突也越发尖锐[7-8]。然而,土地利用功能间权衡/协同关系并非单一的线性或二元化关系,而是一种交叉共生、相互促进又相互制约的耦合交互关系,展现出复杂的非线性特征和显著的空间异质性[9]。因此,明晰土地利用功能间的权衡/协同效应在网格尺度上的时空分布格局和演变规律,进一步探究其内在机理,将有助于推动土地资源的精细化管理[10]。现有研究主要采用相关性分析[11]、全局回归模型[12]、均方根误差模型[13]、力学平衡模型[14]等方法评估不同区域土地利用功能间的权衡/协同效应,为多元土地利用功能的有效调控和管理提供了重要参考。然而,这些方法通常只能反映区域整体特征[15],缺乏空间属性,难以精细地描述土地利用功能间的空间异质性和非线性特征。

此外,由于各功能间的相互博弈与不断变化的排列组合,土地功能系统处于动态震荡状态,表现出显著的自组织性、非线性和不确定性等特征[16],这增加了探究土地利用功能间权衡/协同关系形成机制的难度。现有研究多将土地利用功能作为目标变量[17],通过分析其影响因素来揭示土地利用功能间的权衡/协同关系。然而,这种方法易混淆研究对象,且难以量化影响因子与土地利用功能间关系的关联性,主观性较强。尽管已有部分研究开始关注这一问题,少数研究将土地利用功能间的权衡/协同关系作为目标变量,采用地理探测器[18]和空间滞后模型[19]等方法定量揭示其驱动机制。地理探测器模型通过计算各影响因素的总体贡献度,在一定程度上揭示了影响因素对土地利用功能权衡/协同效应的非线性驱动机制,但各因素在空间上的作用幅度、方向和形式仍不清晰,存在待解决的难点。相比

之下,多尺度地理加权回归模型(Multi-scale geographically weighted regression, MGWR)能在不同空间尺度(带宽)下对自变量进行建模,弥补了传统模型的不足[20]。这一方法能更准确地捕捉到不同因素对土地利用功能权衡/协同效应的空间异质性影响,揭示复杂的驱动机制[21]。MGWR 通过多尺度建模,揭示不同因素在不同空间尺度上的非线性响应机制[22],并能从众多影响因素中筛选出对土地利用功能权衡/协同效应影响最为显著的关键因素[23],有助于集中资源和政策关注,提高土地利用管理的针对性和有效性。此外,土地利用功能的权衡/协同效应受到自然、社会经济、政策等多种因素的共同影响,因素间存在复杂的交互作用,MGWR 能综合考虑多种因素的共同作用,揭示不同空间尺度下的复杂交互关系[24]。因此,MGWR 在土地利用功能权衡/协同效应的驱动机制研究中具有显著优势,能更准确地揭示不同因素在不同空间尺度上的非线性响应机制,为制定科学的土地利用管理和政策提供有力支持。

昆明市位于云贵高原腹地,是云南省“三屏两带”生态安全格局中的重要“高原生态蓄水池”,具有重要的战略意义。同时,昆明市也是云南省经济最发达、城镇化水平最高、人口最密集的地区,城镇生活空间的扩展持续压缩生态空间和农业生活空间,导致土地利用结构发生剧烈变化,生态空间破碎化问题日益加剧[25]。这一现象暴露了昆明市在“生态保护”和“空间开发”间的深层次矛盾,极大地制约了该地区国土空间的整体效益和高质量发展。近年来,我国出台了一系列推动生态保护与可持续发展的政策措施,其中“三区三线”政策明确规定了生态保护红线、城镇开发边界以及永久基本农田保护红线,为土地利用规划提供了指导。在这一政策框架下,如何平衡经济发展与生态保护,优化土地利用结构,已成为亟需解决的关键问题,以应对快速城镇化带来的挑战。因此,厘清土地利用功能间的相互关系,阐明其权衡/协同关系的驱动机制,有助于缓解人地矛盾,确保有限的土地资源能够持续满足人民日益增长的生活需求。本研究以昆明市为研究对象,构建一套基于网格单元的土地利用功能分类量化指标体系,量化 2000、2010、2020 年 3 个时间节点的土地利用功能。采用地理加权回归(GWR)和约束线方法,分析土地利用功能间权衡/协同效应的空间异质性和非线性特征。结合地理探测器和 MGWR 模型,深入探讨“自然-社会-经济”因素在土地利用功能权衡/协同效应中的驱动作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

昆明市是典型的高原山区城市,坐标范围为东经 102°40′~103°40′、北纬 24°23′~26°22′,国土面积为 21 012.54 km^2。自然地势由北向南呈阶梯状逐渐下降,地貌类型复杂多样,相对高差较大,总体上可分为山地、丘陵和坝子 3 种类型。境内有滇池和阳宗海两处大型高原湖泊。独特的地理位置和地形条件使昆明市呈现典型的低纬度高原山地湿润季风气候,具有显著的立体气候特点。全年平均气温为 15.8℃,年均降水量约 1 000 mm,气候温和宜人,夏季无酷暑,冬季无严寒。作为“一带一路”倡议的重要门户,昆明市是连接南亚和东南亚的交通大通道,是国际综合交通枢纽城市。

随着城镇化进程的加快和经济的迅猛发展,高强度的人类活动导致昆明市土地利用结构发生了显著变化。农业空间破碎化、城镇空间低效集约化以及生态环境脆弱性,给不同土地利用功能间的协调发展带来了诸多挑战。如何平衡国土空间开发与保护间的矛盾,优化自然资源要素配置,并实现生态空间绿色可持续、生活空间适度宜居与生产空间高效节约,成为推动国土空间可持续发展的重要课题。

1.2 数据来源

数据主要包括社会经济数据、气象数据、遥感数据、DEM 数据、土壤数据以及土地利用数据。除高程、土壤、道路及河流数据外,其余数据的时间跨度均为 2000—2020 年。土地利用/覆盖数据来源于 Globe Land 30(http://www.globeland30.org),其空间分辨率为 30 m;高程数据由地理云(https://www.gscloud.cn/)提供,分辨率为 30 m。土壤数据来自世界土壤信息(https://data.isric.org),分辨率为 1 km;降水量来自中国气象数据网站(http://data.cma.cn/site),为站点观测数据;蒸散量数据来自国家青藏高原/第三极环境数据中心(http://data.tpdc.ac.cn),分辨率为 1 km;净初级生产力和夜间灯光数据分别来自陆地过程分布式数据档案中心(https://www.usa.gov/)和国家地球系统科学数据共享平台(https://www.geodata.cn/),分辨率均为 500 m;道路与河流数据由云南省国土资源规划设计研究院提供,比例为 1∶250 000;人口统计数据、国内生产总值和粮食产量、林产品等数据来源于昆明统计年鉴(https://www.km.gov.cn/)。

采用统计数据空间化方法,将 GDP、人口、粮食产量和林产品产量等统计数据与遥感数据结合,通过空间化处理进行分析。所有空间数据均使用

ArcGIS 10.2 软件进行投影变换、裁剪、按掩膜提取等预处理操作。数据在预处理过程中统一到同一行政区划（2020 年）和投影坐标系（CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_34），并将空间分辨率统一设定为 1 km × 1 km 的网格单元，最终得到 21 037 个网格作为空间分析单元。

2　研究方法

2.1　土地利用功能分类与量化

2.1.1　土地利用功能分类框架

国土空间是一个复杂的人地耦合系统，受区域资源禀赋、社会经济发展差异、区域发展路径和策略差异影响，导致其发展呈多层次趋势[26]。近年来，为实现国家空间治理体系现代化，我国于 2017 年发布的《全国国土规划纲要（2016—2030）》将国土空间划分为农业空间、城镇空间和生态空间。

农业空间指以提供农产品为主体的功能空间，肩负保障粮食安全的重要责任[27]。总体而言，农业空间以耕地为主要载体，通过农业生产活动获取满足人类生存所必需的粮食和服务，尽管其功能并不局限于此。城镇空间是以城镇建设为主体的功能空间，是人类生活和生产活动的主要载体[28]。城镇空间通过非农业生产活动（如工业生产和服务业）提供所需的工业品和服务产品，推动经济发展，并通过城镇建设用地为居民提供居住、医疗、教育和休闲等生活保障，具备维持经济增长和承载居住需求的能力。生态空间则是以提供生态产品或服务为主体的功能空间，承担维持生态系统稳定性、抵御生态风险并提供生态服务的功能[29]，追求人与自然的和谐共生。因此，为了确保土地资源的高效利用和保护，促进经济社会协调发展，有必要将土地利用功能分类与农业、城镇、生态空间相衔接，以进一步服务于构建以粮食安全、空间集约、人本宜居、绿色高效、生态安全为目标的可持续国土空间新格局，提升国土空间治理能力。综上，将土地利用功能划分为生产功能、生活功能和生态功能（图 1）。

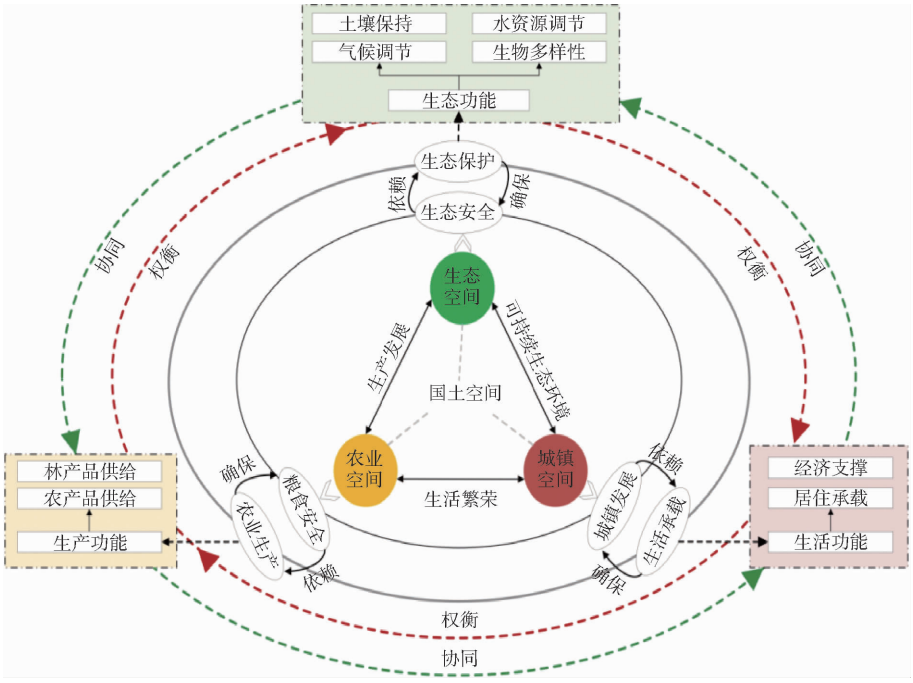


图 1　土地利用功能分类框架

Fig. 1　Classification framework of LUFs

2.1.2　土地利用功能量化

根据上述土地利用功能分类框架、土地本身固有功能属性及昆明市的实际情况，进一步细化土地利用功能（表 1）。在农业空间中，粮食作物供给是其最重要的能力；林产品作为重要原材料，对经济发展及居民生活质量提升具有显著影响[3,9]，因此，生产功能被细分为粮食供给和林产品供给两项次级功能。在生活功能方面，居住条件是满足人类基本生存需求的基础，第二、第三产业发展则是维系居民生活保障的重要因素，因此，生活功能被细分为居住承载和经济支撑两项次级功能。对于生态空间，其目标是确保生态安全，维持生态系统稳定性，并持续提供生态服务[33]。昆明市生态系统主要由森林、草原、湖泊和河流构成，具备较强的固碳、土壤保持和生物多样性等功能。与此同时，随着城镇建设用地快速扩张及人类活动加剧，区域生态系统的结构和功能发生了改变，限制了其生态系统供给能力。基于此，将生

表 1 不同土地利用功能量化方法

Tab. 1 Quantitative methods for various LUFs

土地利用功能	二级功能(权重)	指标	量化方法	描述
生产功能	粮食供应(0.5)	粮食产量	$Y_1=\frac{NPP_i}{NPP_j}CP_{(yield)j}$	NPP_i 和 NPP_j 分别为格网 i 和县域 j 尺度净初级生产力,$CP_{(yield)j}$为全县粮食产量
	林产品供应(0.5)	林产品产量	$Y_2=\frac{F_{(area)i}}{F_{(area)j}}FP_{(yield)j}$	$F_{(area)i}$和 $F_{(area)j}$分别为格网 i 及其县域 j 经济林区域面积;$FP_{(yield)j}$为县域 j 林产品总产量
生活功能	经济支持(0.5)	第二、三产业产值	$ES_i=\frac{GDP_{2j}+GDP_{3j}}{DL_j}DL_i$	ES_i 为网格 i 非农产值;GDP_{2j}和 GDP_{3j}为县域 j 第二、三产业产值;DL_i 和 DL_j 分别为网格 i 和县域 j 总 DMSP/OLS 夜间灯光值[30]
	居住支持(0.5)	人口密度	$RC_i=\frac{POP_j}{u_jHSI_j}u_iHSI_i$ $HSI=\frac{(1-NDVI_{\max})+DL'}{(1-DL')+NDVI_{\max}+DL'NDVI_{\max}}$	RC_i 为网格 i 人口密度;u_i 和 u_j 分别为网格 i 和县域 j 城市居民和农村居民数量;HSI_i 和 HSI_j 分别为网格 i 和县域 j 人类聚集指数;POP_j 为县域 j 人口数量;DL'为夜间灯光标准化值;$NDVI_{\max}$为归一化植被指数最大值[31]
生态功能	气候调节(0.22)	碳储量	InVEST 模型[12,32]	
	生物多样性(0.29)	生境质量		
	水资源调控(0.11)	产水量		
	土壤保持(0.38)	土壤保持量	RUSLE 模型	

态功能细分为气候调节、生物多样性、土壤保持和水资源调节 4 项次级功能。首先采用 Min - Max 归一化方法对指标因子进行归一化处理,以消除次级功能中量纲的影响。随后,将生产功能和生活功能的各项次级功能赋予相同权重,而生态功能的各项次级功能权重则采用熵权法确定。最后,通过加权模型分别计算各土地利用功能值。

2.2 LUFs 间权衡/协同关系测度方法

2.2.1 Spearman 相关性分析

采用 Spearman 相关分析法识别研究区 2000—2020 年各土地利用功能间的权衡/协同关系。Spearman 相关系数 r 为正,并且通过 0.05 显著性水平检验,说明两个土地利用功能间存在协同关系;r 为负,表示两个土地利用功能间存在权衡关系;r 绝对值接近 0,表示两个土地利用功能间不相关。土地利用功能权衡/协同作用关系强弱随相关系数绝对值变化。

2.2.2 地理加权回归(GWR)

Spearman 相关性分析虽能揭示区域整体土地利用功能间的权衡/协同关系,但无法进一步探讨其空间异质性。因此,采用地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR),以网格尺度 1 km × 1 km 分析土地利用功能间权衡/协同效应的空间异质性。首先,为了确保土地利用功能间权衡/协同效应具有可比性,对生产功能、生活功能和生态功能分别进行标准化处理。接下来,将每两项土地利用功能分别作为自变量和因变量进行回归分析,以揭示它们间的相互作用关系。当回归系数大于 0 表示两者间存在协同关系;当回归系数小于 0 时,表示两者间存在权衡关系。通过 GWR 模型,可以分析不同区域或网格单元中土地利用功能间的协同或权衡效应,并揭示这些效应的空间异质性。

2.2.3 约束线提取

自然、社会经济等多种因素的影响导致土地利用功能间的关系呈现强烈的不确定性和非线性,而非简单的线性关系[34]。约束线方法已被证明能有效刻画不同变量间复杂的非线性特征[35]。目前,约束线的绘制方法主要包括参数法、散点云网格法、分位数回归法和分位数分割法。采用分位数分割法提取约束线。具体步骤如下:首先,将 2000—2020 年成对土地利用功能数据在直角坐标系中绘制成散点图;然后,将 x 轴数值从小到大排序,将值域划分为 100 组,并在每组内选取对应的 99.9% 位置值作为该区间的边界;最后,使用 Origin 2021 软件对所提取的边界点进行拟合,得到约束线。约束线提取示意图如图 2 所示。

2.3 LUFs 间权衡/协同效应驱动机制

2.3.1 影响因素选取

区域自然环境因素变化与社会经济发展共同塑造人地关系系统的结构和演变轨迹[19,36],并推动土地利用功能的变化,从而影响各功能间的权衡/协同关系。在充分考虑数据可获取性和代表性的基础上,结合前人研究成果[37],从自然条件、地理区位、社会经济及生态景观 4 方面构建一个涵盖 14 个潜在影响因素的指标体系(表 2)。所有影响因素均基于 2020 年数据。

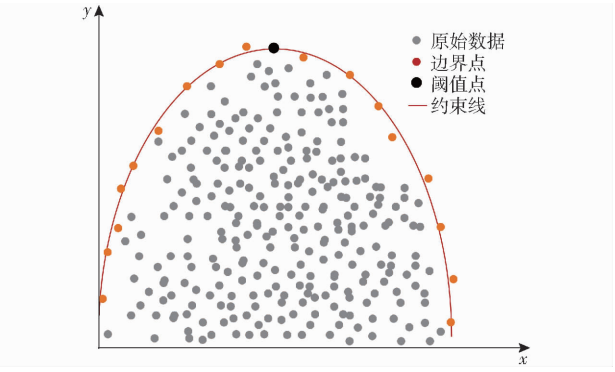


图 2　约束线提取示意图

Fig. 2　Diagram of constraint line extraction

2.3.2　地理探测器

地理探测器是一种用于检验变量空间异质性并揭示其背后驱动力的统计方法，自提出以来受到了学者的广泛关注。其核心思想基于以下假设：若某一自变量对某一因变量具有重要影响，则其在空间分布上应表现出一定的相似性[38]。地理探测器主要包括因子探测器、交互作用探测器、风险探测器和生态探测器。主要使用因子探测器来识别土地利用功能间权衡/协同效应的主导因子。

因子探测器用于探测某个影响因子 X 对 LUFs 权衡/协同效应 Y 空间异质性的解释程度，其解释程度由 q 统计量表示。q 取值范围为[0,1]，q 越大，表明影响因子 X 对土地利用功能间权衡/协同效应 Y 的解释力越强。地理探测器软件可以从 http://www.GeoDetector.org 网站免费获取。

表 2　土地利用功能潜在影响因素指标体系

Tab. 2　Index system for potential influencing factors of LUFs

指标选择	潜在影响因素	定量方法/来源
自然条件	高程(m)	DEM
	坡度((°))	ArcGIS 坡度工具
	降水量(mm)	国家青藏高原/第三极环境数据中心
	归一化植被指数(NDVI)	Landsat7/8
地理区位	与省道距离(m) 与县道距离(m) 与市中心距离(m) 与县中心距离(m) 与乡镇中心距离(m) 与河流距离(m)	ArcGIS 欧氏距离工具
社会经济	土地利用程度	$L_j=100\sum_{i=1}^{n}A_iC_i$，式中 L_j 为土地利用程度综合指数；A_i 为第 i 级土地利用类型分级指数；C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积百分比；n 为土地利用程度分级数。未利用地分级指数为 1、林地、草地和水域为 2、耕地为 3、建设用地为 4
	人类活动强度(%)	$HAI_j=\frac{S_{CLE-i}}{S}\times 100\%$，$S_{CLE-i}=\sum_{j=1}^{6}(L_{Sij}I_{Cij})$，式中 HAI_i 为第 i 个网格的人类活动强度；S_{CLE-i} 为网格 i 的建设用地当量面积；S 为网格 i 总面积；L_{Sij} 为第 i 个网格内第 j 类土地利用类型面积；I_{Cij} 为第 i 个网格内第 j 类土地利用类型建设用地折算系数。耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地建设用地折算系数分别为 0.2、0.13、0.1、0.6、1 和 0
生态景观	集聚指数 香农多样性指数	Fragstats 软件

2.3.3　多尺度地理加权回归模型(MGWR)

MGWR 是 GWR 的一种扩展。传统的 GWR 模型假设所有观测位置的回归系数由相同带宽(即空间权重)来确定，而 MGWR 模型则允许在不同地理尺度上进行回归分析，即每个自变量可以结合不同空间带宽，广泛应用于环境科学、城市研究、公共卫生等领域。MGWR 模型能有效捕捉变量间的空间异质性，即变量间的关系随着地理位置而变化，尤其是在样本数据具有明显的空间分布特征时，能提供更准确的参数估计，并且具有较强灵活性。作为一种强大的空间分析工具，MGWR 模型可用来探究不同空间位置上各类变量间的相互作用关系。通过允许自变量在不同空间尺度上呈现不同效果，MGWR 模型为回归分析提供了更灵活和准确的框架，这使其在多种应用领域中具有重要的现实意义。本文 MGWR 模型计算基于美国亚利桑那州立大学空间分析研究中心(SPARC)开发的 MGWR 2.2 软件(https://sgsup.asu.edu/SPARC)。在模型参数设置方面，选择高斯核函数作为 MGWR 模型的核函数，并采用 AICc(修正赤池信息量)准则作为带宽选择的基本准则。

3　结果分析

3.1　LUFs 时空演变特征

根据各土地利用功能的冷热点分析结果，生产功能和生态功能空间分布及冷热点格局具有明显的

空间异质性，呈现“大分散，小集聚”分布特征，而生活功能未出现冷点，热点则呈现“点状”的空间分布特征（图 3a，图中 PF 为生产功能，LF 为生活功能，EF 为生态功能，下同）。生产功能在 2000 年和 2010 年 2 个时段的热点区域主要集中在昆明市东南和西南部，这些区域地势平坦，耕地较多，粮食产量较高。然而，随着近年来城镇化进程加快，西南区域热点逐渐向东南区域迁移，至 2020 年仅集中于东南部区域。生产功能冷点主要分布于昆明市中南部和北部区域，并呈逐渐向西南和东北迁移的趋势，表现为“点状”空间分布特征。从生产功能发展方向来看（图 3b），2000—2020 年间，其椭圆面积减小，x 轴标准差减少幅度大于 y 轴，表明生产功能的重心持续由西向东迁移。

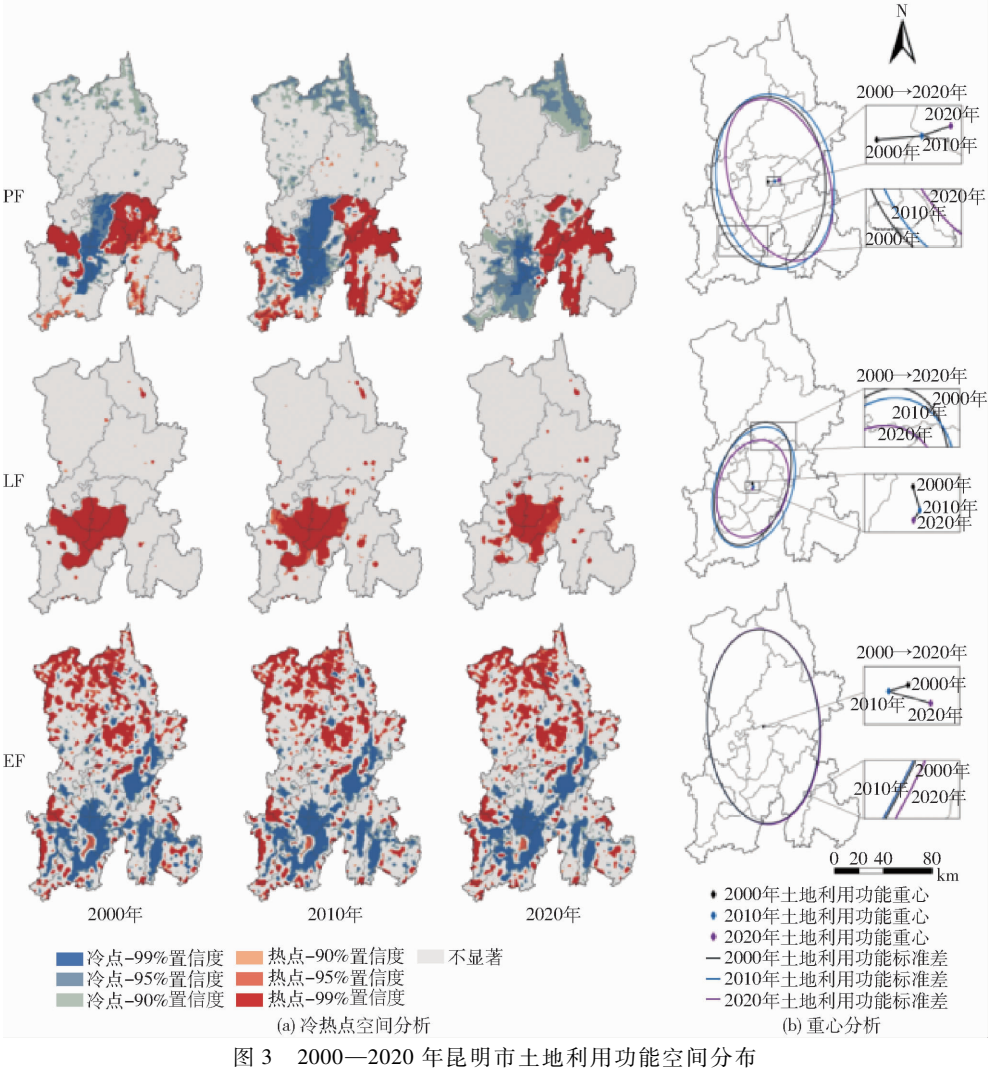


图 3 2000—2020 年昆明市土地利用功能空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of LUF in Kunming City from 2000 to 2020

生活功能分布无冷点，热点主要集中在昆明市中心城区及其周边县城区域。这一现象反映了昆明市城乡发展差距较大，教育、医疗、交通等基础设施及人口集聚在中心城区和周边县城。此外，2000—2020 年，中心城区虹吸效应明显大于溢出效应，使得生活功能的椭圆面积持续缩小，且生活功能重心呈向南迁移趋势。生态功能热点区域主要分布在昆明市北部，这些区域地势陡峭，海拔较高，人类活动较少，且分布着轿子山国家自然保护区和金沙江干热河谷等具有高生态价值区域。总体来看，生态功能热点多集中在山区及其周边地区，受自然地形特征的影响较大。生态功能冷点主要分布在昆明市南部，并呈扩展趋势。

3.2 土地利用功能间权衡/协同效应

3.2.1 土地利用功能间权衡/协同效应时空分布格局

对 2000—2020 年昆明市生产功能、生活功能和生态功能进行 Spearman 相关性分析，得到土地利用功能间的相关系数（图 4b ~ 4d，图中 ** 表示 $p \leqslant 0.01$，EF&PF 表示生态功能与生产功能间相互关系，EF&LF 表示生态功能与生活功能间相互关系，LF&PF 表示生活功能与生产功能间相互关系，下同）。研究结果表明：所有土地利用功能间的相关性均通过了显著性检验（$p \leqslant 0.01$）。生态功能与生产功能间相关系数 r 由 2000 年的 0.044 上升至

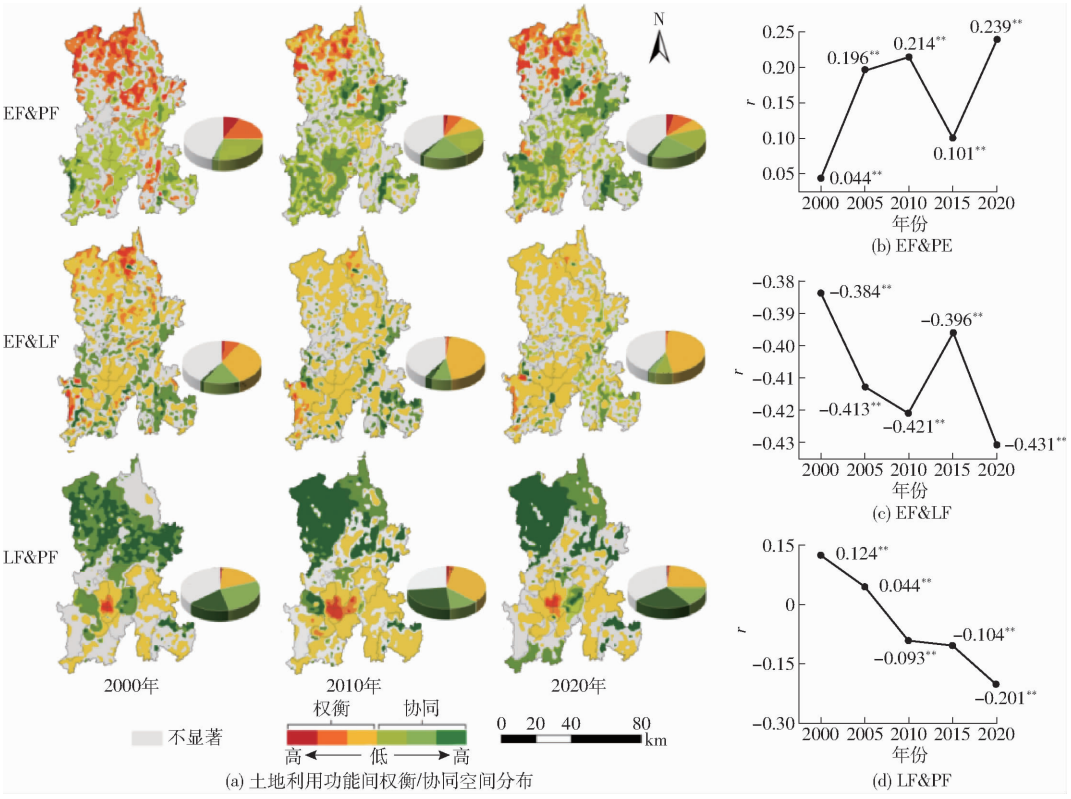


图 4　2000—2020 年不同土地利用功能间权衡/协同效应

Fig. 4　Trade-offs/synergies among various LUFs from 2000 to 2020

2020 年的 0.239，r 均大于 0，表明两者呈协同关系，且协同程度呈波动上升趋势。生态功能与生活功能间的相关系数 r 均小于 0，表明两者呈权衡关系，且该相关系数整体呈波动下降趋势，到 2020 年达到最小值（−0.431），表明权衡程度总体呈上升趋势。生活功能与生产功能间的相关系数 r 呈下降趋势，由 2000 年的 0.124 下降至 2020 年的 −0.201，经历了由协同关系转变为权衡关系的过程，2000—2005 年表现为协同关系，2010—2020 年则表现为权衡关系，且权衡程度不断增强。这一变化的主要原因是 2000 年以来昆明市城镇化进程的加快，为满足人们对美好生活环境的追求，城镇空间的扩张压缩了农业和生态空间。

为进一步探析各土地利用功能间权衡/协同效应的空间异质性，基于 1 km × 1 km 网格单元，借助 GWR 模型计算各土地利用功能间的空间交互相关性，并将通过显著性检验（$p \leqslant 0.05$）的回归系数进行空间化（图 4a）。研究发现：2000—2020 年间，生态功能与生产功能的协同效应在空间分布上占比高于权衡效应，表明两者在空间上整体表现为协同关系。权衡效应较高区域主要集中在昆明市北部，协同效应较高区域则集中在昆明市南部，并有随时间逐渐向北扩展趋势。研究时段内，生态功能与生活功能的权衡效应空间分布比例远高于协同效应，并呈上升趋势。权衡效应区域广泛分布于整个研究区，并逐步向南扩张；协同效应区域主要呈“点状”围绕中心城区分布，且在研究期间由 16.6% 降低至 10.5%，呈下降趋势。生活功能与生产功能的权衡效应区域主要集中在昆明市南部，且随着时间推移有逐渐向北迁移趋势。强权衡效应主要集中在昆明市中心城区；协同效应则主要集中在昆明市北部。

3.2.2　LUFs 间权衡/协同效应非线性特征

生产功能、生活功能和生态功能两两间的约束线提取结果显示生态功能与生产功能、生活功能与生产功能的约束线类型一致，两者间呈现倒“U”形的凸函数关系分布，并且具有显著的边界效应，而生态功能与生活功能则呈现凹权衡分布（图 5，图中红点表示边界点，蓝点表示数据点）。生态功能与生产功能间的权衡/协同效应表现出显著的非线性特征，具体为凹函数关系。两者之间存在一个边界点，在此点上两者间的权衡/协同关系发生转变。边界点左侧表现为协同，且随着生态功能增加，生产功能增长加速率逐渐减小；而边界点右侧则表现为权衡，且随着生态功能持续增加，生产功能损失速率逐渐增大。生态功能与生活功能间的权衡/协同效应表现为凸权衡关系，随着生态功能增加，生活功能逐渐降低，并且降低速率也逐渐减小。这表明，在生态功能增大的过程中，生活功能减少速度逐渐变缓。生活功能与生产功能间呈倒“U”形凹函数关系，且也

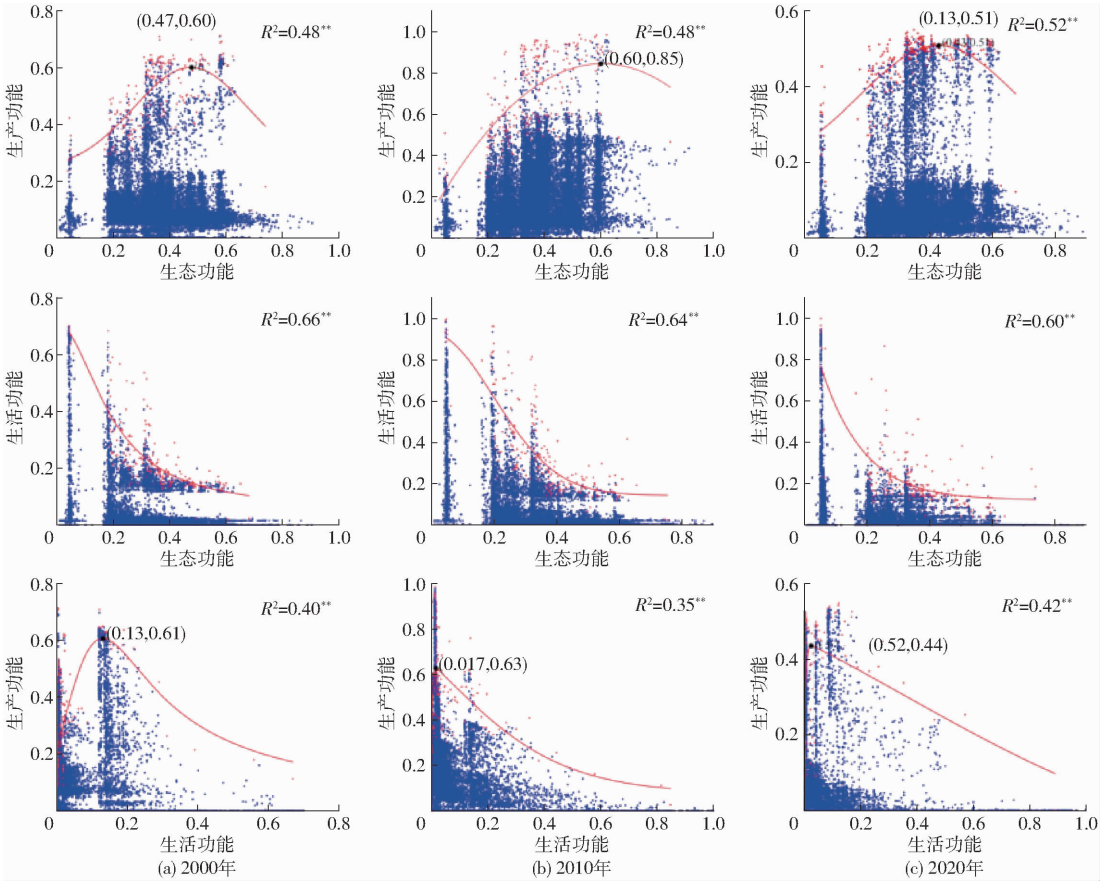


图 5 2000—2020 年土地利用功能间非线性关系

Fig. 5 Nonlinear relationship among LUFs from 2000 to 2020

存在一个边界点。在临界点左侧,表现为协同,随着生活功能增加,生产功能增加速率逐渐减小;而在边界点右侧,表现为权衡,随着生活功能的持续增加,生产功能损失速率逐渐增大。

综上所述,3 个功能间的权衡/协同效应表现出显著的非线性特征,不同功能间的相互关系在不同空间或时间尺度上呈不同转变趋势和特征。

3.3 LUFs 间权衡/协同效应驱动因素

3.3.1 LUFs 间权衡/协同效应主导因子识别

采用容差和方差膨胀因子(Variance inflation factor, VIF)分析方法来检验 LUFs 影响因子间的多重共线性问题,结果表明所有影响因子间不存在多重共线性问题。根据 SPSS 20.0 软件的多重共线性分析结果(表 3),各个土地利用功能间权衡/协同效应模型的容差均大于 0.2,VIF 均小于 5,说明影响因子间没有严重的共线性问题,确保了模型的有效性和稳定性。

表 3 影响因子多重共线性检验

Tab. 3 Multicollinearity test of influencing factors

影响因子	EF&PF		EF&LF		LF&PF	
	容差	VIF	容差	VIF	容差	VIF
高程	0.274	3.643	0.255	3.923	0.236	4.232
坡度	0.477	2.098	0.484	2.068	0.517	1.932
降水量	0.229	4.370	0.212	4.723	0.204	4.898
与省道距离	0.792	1.263	0.780	1.281	0.776	1.289
与县道距离	0.760	1.316	0.745	1.342	0.709	1.411
与市中心距离	0.321	3.117	0.304	3.293	0.331	3.024
与县中心距离	0.456	2.194	0.430	2.327	0.461	2.169
与乡镇中心距离	0.652	1.533	0.645	1.549	0.637	1.569
人类活动强度	0.337	2.970	0.289	3.455	0.268	3.730
土地利用程度	0.242	4.130	0.220	4.542	0.204	4.898
NDVI	0.469	2.130	0.460	2.173	0.429	2.332
与河流距离	0.853	1.172	0.853	1.912	0.891	1.977
香农多样性指数	0.531	1.882	0.523	1.868	0.506	1.912
集聚指数	0.541	1.850	0.535	3.923	0.523	4.232

通过地理探测器模型分析,探讨了不同因子对昆明市 LUFs 间权衡/协同效应的影响(图 6)。从图 6 可以看出,影响生态功能与生产功能间权衡/协同效应的主导因子分别为:与市中心距离(解释力为 0.241 2)、降水量(解释力为 0.137 2)、与县中心距离(解释力为 0.094)、高程(解释力为 0.070 9)和坡度(解释力为 0.049 3)。生态功能与生活功能权衡/协同效应的主导因子分别为:高程(解释力为 0.083 1)、土地利用程度(解释力为 0.077 9)、与市中心距离(解释力为 0.064 9)、坡度(解释力为 0.064 6)和人类活动强度(解释力为 0.060 4)。生活功能与生产功能权衡/协同效应的主导因子分别

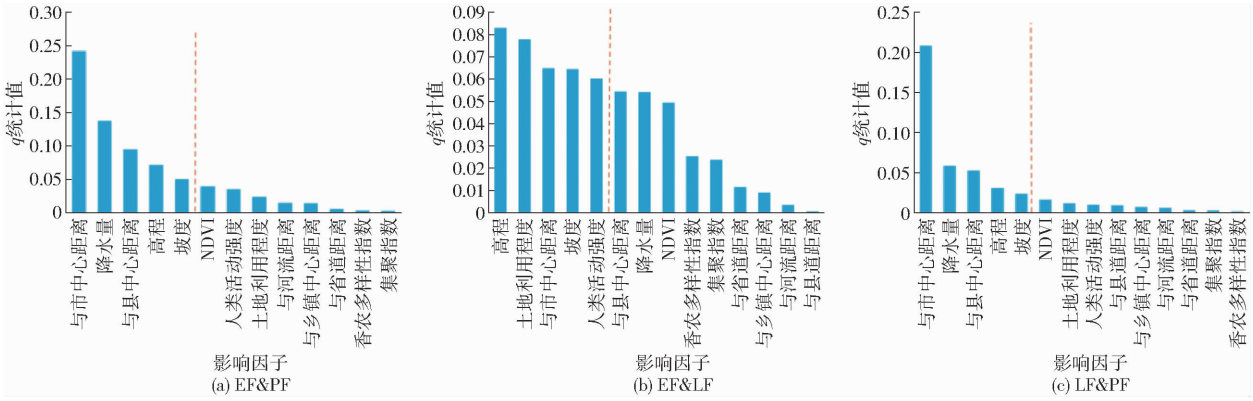


图 6　LUFs 间权衡/协同效应主导因子识别

Fig. 6　Identification of dominant factors for LUFs trade-offs/synergies

为：与市中心距离（解释力为 0.208 2）、降水量（解释力为 0.058 6）、与县中心距离（解释力为 0.052 5）、高程（解释力为 0.030 9）和坡度（解释力为 0.023 4）。综上所述，昆明市 LUFs 间的权衡/协同效应主要受到自然因素（如降水量、高程、坡度）、区位因素（如与市中心距离、与县中心距离）以及社会经济因素（土地利用程度、人类活动强度）的共同影响。通过分析这些主导因子的空间异质性，可以为昆明市未来的土地利用管理和生态保护提供重要的决策依据。

3.3.2　基于 MGWR 的 LUFs 间权衡/协同效应驱动因素识别

通过构建 MGWR 模型，深入分析了影响因素对土地利用功能间相互关系的空间异质性，旨在更准确地揭示 LUFs 间权衡/协同效应的深层驱动机制。MGWR 模型是一种改进的地理加权回归模型（GWR），兼顾了不同影响因子在空间上的差异化作用，是识别目标变量局部影响因子的有效工具。根据 MGWR 模型的分析结果，LUFs 间权衡/协同效应的调整后决定系数 R^2 为 0.856，表明模型具有较好的拟合效果，适合用于探讨土地利用功能间权衡/协同效应的驱动因素。

通过显著性检验（$p \leqslant 0.05$）的主导因子回归系数进行空间化，得出各主导因子在空间上的驱动情况（图 7）。区位因素：与市中心距离是影响土地利用功能间相互关系的主要因素。与市中心距离与生态功能和生产功能间的权衡效应呈正相关分布，而与生态功能和生活功能、生活功能与生产功能间的权衡效应则呈相反趋势。与区县中心距离对生态功能与生产功能间权衡效应的影响呈正相关分布，且其回归系数呈南高北低的空间分布；对生活功能与生产功能间的权衡效应影响以正向为主。社会经济因素：土地利用程度对生态功能与生活功能间的权衡效应影响呈正相关分布，且影响表现为北高南低的空间分布。人类活动强度对生态功能与生活功能间的权衡效应影响也呈正相关分布，影响强度从昆明市中心城区向周边逐渐递减。自然因素：降水量对对生态功能与生产功能、生活功能与生产功能间的权衡效应主要以负向为主，降水变化会影响区域的水资源供给和局部气候，从而影响 LUFs 间的相互作用关系。高程对对生态功能与生产功能、生态功能与生活功能间的权衡效应影响呈正相关分布，而对生活功能与生产功能间的权衡效应影响则呈负相关分布。坡度对 3 对 LUFs 间的权衡效应主要表现为正相关分布。

综上所述，区位因素、社会经济因素和自然因素在昆明市 LUFs 间的权衡/协同效应中扮演重要角色，且不同因子的空间异质性对 LUFs 间的相互关系产生了显著影响。通过深入分析这些影响因素的空间分布规律，能为昆明市未来的土地利用规划和生态保护提供更有针对性的政策建议。

4　讨论

4.1　LUFs 间权衡/协同关系驱动机制

由于自然和人为因素对人地关系地域系统的影响复杂且具有非线性特征，传统线性回归模型难以有效量化这些因素对系统的作用[19]。因此，选择昆明市作为研究区域，构建了 MGWR 模型，探讨了土地利用功能间权衡/协同效应的非线性响应机制，并深入揭示这些效应变化的空间异质性。

土地利用功能间的权衡/协同效应受到多种因素的共同驱动。从“自然-区位-社会经济—生态景观”等多个角度选取 14 个影响因素进行分析。研究发现，自然因素（坡度、高程、NDVI）、区位因素（与市中心距离、与县中心距离）、社会经济因素（土地利用程度）以及生态景观（香农指数）是昆明市土地利用功能间权衡/协同效应的主要驱动因素。自然因素：坡度和 NDVI 是对土地利用功能相互关系

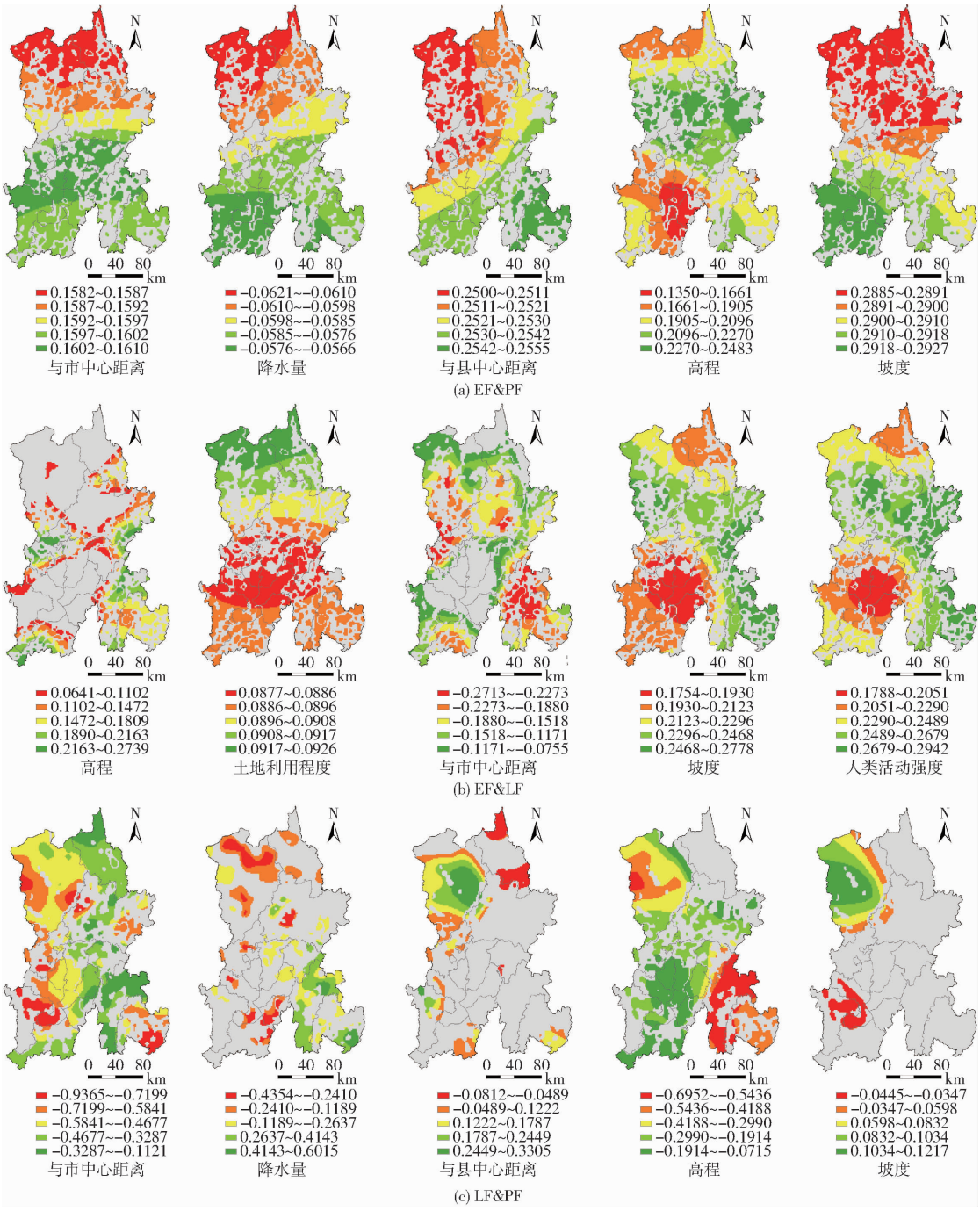


图 7 主导因子对 LUFs 权衡效应影响的空间异质性

Fig. 7 Spatial heterogeneity of influence of dominant factors on LUFs trade-offs effect

起显著作用的关键因素。坡度影响土壤水分和侵蚀程度,限制农业活动,进而影响经济收益与生态服务间的权衡。NDVI 反映植被覆盖度,是生态功能与其他功能间协同效应的重要体现。区位因素:与市中心距离显著影响土地利用功能间的关系。市中心附近的区域受到城市化和经济活动的强烈影响,土地利用功能更倾向于生活和生产功能,这种功能集聚促进了规模经济与互补性,表现出较强的协同效应。社会经济因素:土地利用程度表现出较大的复杂性。过度开发可能导致生态功能退化,而适度开发有助于生态恢复。土地利用程度较高区域可能对生态功能产生负面影响,从而引发生态功能与其他功能间的权衡效应。生态景观:香农指数较高地区具有丰富的生物多样性,有助于生态功能的持续维持,并促进生态功能与其他功能间的协同发展。综上所述,以上因素的相互作用决定了不同土地利用功能间的关系,为土地管理与生态保护提供了重要的理论依据和实践指导,实现资源的可持续利用与经济发展之间的平衡。

4.2 土地利用功能管理政策启示

在全面考虑昆明市各区域空间异质性特征及潜在土地利用功能权衡效应的基础上,提出了差异化

的空间管理政策和引导措施，以优化土地资源配置，提高土地利用整体效益，推动国土空间向更高质量、更高效率、更公平和更可持续的发展。主要建议如下：

（1）生态功能核心区管理：昆明市生态功能核心区主要分布在北部山区，该区域生态功能与生产功能间的权衡最为明显。该区域包括金沙江、小江、普渡河流域及其支流，以及三台山、拱王山、梁王山等自然山脉，是全市生态安全的关键区域，亟需重点加强生态系统和生物多样性保护。由于该区域地貌复杂，且生态破坏严重，建议加强生态修复，特别是在小江、普渡河流域源头地区实施系统的地表植被恢复工程，并加强水源涵养区建设，保护湿地、森林和草原等生态系统，恢复其水源涵养、气候调节和生物多样性保护功能。此外，应依托该区域的高原山地资源，发展特色生态农业产业，如种植天麻、三七等中药材，种植优质坚果和水果，并发展生态畜禽养殖，推广绿色无公害农产品。这些产业化措施，将增加当地农民收入，缓解生态空间与生产空间的矛盾，促进区域经济可持续发展[39]。

（2）生产功能核心区管理：昆明市南部的坝子区域（如寻甸坝子、嵩明坝子和宜良坝子）为生产功能核心区，适合城镇建设与农业生产。为解决城镇建设与农业生产的冲突，建议严格按照“三区三线”政策，明确城镇开发边界，控制城镇扩张规模，并优先在非耕地、低效农业用地及未开发区域安排建设用地。此外，可以在城镇周边或城乡结合部发展农业示范区或产业园区，促进优质农产品规模化种植和加工，提升农业附加值。同时，依托优美自然环境，开发农业观光旅游项目，提升农业土地经济效益。

（3）生活功能核心区管理：昆明市生活功能核心区主要集中在市区及周边县城。该区域应以滇池和西山为核心保护区，严格遵守“三区三线”政策，确保城市建设不超过生态保护红线，优先规划非生态敏感区域为城市扩展方向，特别是向滇池流域外扩展。同时，建议开展滇池和阳宗海的水生态修复工程，控制周边农业和工业的污染排放，通过湿地恢复和植被种植等措施提高水体自净能力，改善水质。进一步地，依托城市公园、郊野公园等生态节点，构建城市绿地生态廊道和生态景观通风廊道，增加绿化面积，改善空气流通和局部气候，提升城市的宜居环境。

4.3　局限性和展望

本研究提出了一套可行方法，探索了土地利用功能间权衡/协同效应的空间异质性及其内在机制，尤其是权衡/协同效应对“自然-社会-经济”因素的非线性响应机制和阈值效应，但仍存在一定局限性。首先，由于基础数据和研究方法限制，构建的土地利用功能量化体系尚需进一步完善。例如，生活功能分类和量化仅考虑经济支撑和居住承载 2 个次级功能，未能涵盖就业支持和社会保障等其他功能。其次，本研究主要依赖遥感数据和统计年鉴数据，这些数据具有广泛的空间覆盖范围和较强的时间连续性，但在精度和空间分辨率方面仍存在不足[40]。例如，所使用的 NPP－VIIRS 夜间灯光数据（空间分辨率为 500 m×500 m）虽能在一定程度上反映人类活动强度和社会经济状况，但较低的空间分辨率可能导致低密度城乡过渡区和高密度商业区混合，进而产生量化生活功能时的空间均质化误差。因此，后续研究应进一步探索适合的统计数据空间化方法，构建更全面、系统且适用于网格尺度的土地利用功能分类和量化指标体系。其次，研究表明，并非所有的协同效应都呈“1 + 1 > 2”效果[41]。在某些情况下，当两种功能都呈现衰退趋势时，协同效应可能会带来显著的负面影响。例如，生态功能退化会削弱自然系统的恢复力，进而引发土地荒漠化、水体污染等环境问题，直接侵蚀农业生产基础，导致耕地生产力下降，并迫使扩大土地开发规模，从而加剧生态系统的破坏，形成“生态退化→农业生产受阻→土地开发加剧→生态持续恶化”的恶性循环。因此，未来研究应进一步探讨不同土地利用功能间权衡/协同效应的作用方向，以便为决策提供更有效的支持。此外，采用了 GWR 模型分析土地利用功能间的权衡/协同关系，但 GWR 模型依赖于局部平稳性假设，即假设变量间的关系在局部范围内保持稳定。然而，土地利用功能间的相互作用可能受到多尺度因素的影响，导致局部稳定性假设存在偏差。因此，未来研究应从权衡/协同关系的定义出发，探索一套适合的方法来量化土地利用功能间的相互作用。最后，本研究揭示了影响因素与土地利用功能间权衡/协同效应的关系及其影响程度，但在空间层面上，这些因素的作用机制仍不完全明确。未来研究应重点探索在空间维度上量化影响因素对土地利用功能间权衡/协同效应的作用方式，以便更精确地理解其空间异质性。

5　结论

（1）土地利用功能间权衡/协同效应呈显著的时空异质性。2000—2020 年，生态功能与生产、生活功能间表现出逐渐增强的协同效应与权衡效应，而生活功能与生产功能间的关系由协同转为权衡。

生态功能与生产功能、生活功能与生产功能间的作用模式呈倒“U”形凹函数分布,而生态功能与生活功能间则呈“U”形凸函数分布。

(2)与市中心距离对土地利用功能间权衡/协同效应影响最大,降水量、高程、坡度、与县中心距离、土地利用程度和人类活动强度是主要驱动因素。

(3)土地利用功能间权衡/协同效应与主导因素间存在较强的空间异质性。降水量对土地利用功能间的关系呈负向影响,高程、坡度、土地利用强度和人类活动强度则呈正向影响。与市中心和县中心距离对生态功能与生产功能间的作用关系呈正向影响,但对其他功能间的作用关系则呈负向影响。

参 考 文 献

[1] MENG Jijun, CHENG Haoran, LI Feng, et al. Spatial-temporal trade-offs of land multi-functionality and function zoning at finer township scale in the middle reaches of the Heihe River[J]. Land Use Policy, 2022, 115: 106019.

[2] LIU Chao, XU Yueqing, LU Xinhai, et al. Trade-offs and driving forces of land use functions in ecologically fragile areas of northern Hebei Province: spatiotemporal analysis[J]. Land Use Policy, 2021, 104: 105387.

[3] LIU Yuan, YUAN Xiuliang, LI Jiaxin, et al. Trade-offs and synergistic relationships of ecosystem services under land use change in Xinjiang from 1990 to 2020: a Bayesian network analysis[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 160015.

[4] LIU Chao, XU Yueqing, HUANG An, et al. Spatial identification of land use multifunctionality at grid scale in farming-pastoral area: a case study of Zhangjiakou City, China[J]. Habitat International, 2018, 76: 48 - 61.

[5] 黄安,许月卿,卢龙辉,等. “生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 503 - 518.
HUANG An, XU Yueqing, LU Longhui, et al. Research progress of the identification and optimization of production - living - ecological spaces[J]. Progress in Geography, 2020, 39(3): 503 - 518. (in Chinese)

[6] LIU Chao, CHENG Long, LI Jia, et al. Trade-offs analysis of land use functions in a hilly-mountainous city of northwest Hubei Province: the interactive effects of urbanization and ecological construction[J]. Habitat International, 2023, 131: 102705.

[7] KIM I, ARNHOLD S. Mapping environmental land use conflict potentials and ecosystem services in agricultural watersheds[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 827 - 832.

[8] CHEN Zongfeng, LI Yurui, LIU Yansui, et al. Does rural residential land expansion pattern lead to different impacts on eco-environment? A case study of loess hilly and gully region, China[J]. Habitat International, 2021, 117: 102436.

[9] LI Yongge, LIU Wei, FENG Qi, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 855: 158940.

[10] 钱彩云,巩杰,张金茜,等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 868 - 879.
QIAN Caiyun, GONG Jie, ZHANG Jinqian, et al. Changes in ecosystem services and trade-offs and synergies in Gansu Bailongjiang River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 868 - 879. (in Chinese)

[11] WEI Chao, WU Zhou, XING Jian, et al. Trade-off or synergy? Dynamic analysis and policy insights on land use functions in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 105: 107399.

[12] LIU Youyan, LIU Xingyuan, ZHAO Chuanyan, et al. The trade-offs and synergies of the ecological-production-living functions of grassland in the Qilian mountains by ecological priority[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116883.

[13] CHEN Yang, YANG Jun, YU Wenbo, et al. Relationship between urban spatial form and seasonal land surface temperature under different grid scales[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 89: 104374.

[14] HE Weikang, LI Xiaoshun, YANG Jun, et al. How land use functions evolve in the process of rapid urbanization: evidence from Jiangsu Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 134877.

[15] JOPKE C, KREILING J, MAES J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. Ecological Indicators, 2015, 49: 46 - 53.

[16] TRAN D X, PEARSON D, PALMER A, et al. Quantifying spatial non-stationarity in the relationship between landscape structure and the provision of ecosystem services: an example in the New Zealand hill country[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152126.

[17] XIA Hao, YUAN Shaofeng, PRISHCHEPOV A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: implications for spatial planning and management[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106767.

[18] ZHAO Jia, ZHAO Yuluan. Synergy/trade-offs and differential optimization of production, living, and ecological functions in the Yangtze River economic belt, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 147: 109925.

[19] ZHU Congmou, DONG Baiyu, LI Sinan, et al. Identifying the trade-offs and synergies among land use functions and their influencing factors from a geospatial perspective: a case study in Hangzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128026.

[20] 张睿思,叶思菁,任书义. 基于 MGWR 模型的江苏省耕地细碎度空间格局与驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 229 - 239.
ZHANG Ruisi, YE Sijing, REN Shuyi. Jiangsu Province farmland fragmentation spatial pattern and driving factor analysis

based on MGWR model[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 229 – 239. (in Chinese)

[21] HU Jinyu, ZHANG Jiaxin, LI Yunqin. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: the case of Nanjing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109333.

[22] SONG Mengru, WANG Yanjun, HAN Yongshun, et al. Estimation model and spatio-temporal analysis of carbon emissions from energy consumption with NPP – VIIRS – like nighttime light images: a case study in the Pearl River delta urban agglomeration of China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(18): 3407.

[23] 曾凯豪,唐健,杨剩富. 土地利用功能权衡协同关系及其驱动因子研究——以武汉市为例[J]. 中国土地科学, 2024, 38(6): 66 – 77.
ZENG Kaihao, TANG Jian, YANG Shengfu. Land use function trade-off and synergy relationship and its driving factor research—a case study of Wuhan City[J]. Land Science, 2024, 38(6): 66 – 77. (in Chinese)

[24] WU Meimei, WEI Xuan, GE Wei, et al. Analyzing the spatial scale effects of urban elements on urban flooding based on multiscale geographically weighted regression[J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132178.

[25] WU Xue, LIU Shiliang, SUN Yongxiu, et al. Ecological security evaluation based on entropy matter-element model: a case study of Kunming City, Southwest China[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 469 – 478.

[26] QU Yanbo, WANG Shilei, TIAN Yaya, et al. Territorial spatial planning for regional high-quality development—an analytical framework for the identification, mediation and transmission of potential land utilization conflicts in the Yellow River Delta[J]. Land Use Policy, 2023, 125: 106462.

[27] QIN Yujia, WANG Lingzhi, YU Ming, et al. The spatio-temporal evolution and transformation mode of human settlement quality from the perspective of "production-living-ecological" spaces—a case study of Jilin Province[J]. Habitat International, 2024, 145: 103021.

[28] WANG Jianying, SUN Qi, ZOU Lilin. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of rural production-living-ecological space in Pingtan islands, China[J]. Habitat International, 2023, 137: 102833.

[29] ZOU Lilin, LIU Yansui, WANG Jianying, et al. An analysis of land use conflict potentials based on ecological-production-living function in the southeast coastal area of China[J]. Ecological Indicators, 2021, 122: 107297.

[30] ZHANG Yingnan, LONG Hualou, TU Shuangshuang, et al. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: implications for sustainable land management[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105550.

[31] CHEON S H, KIM J A. Quantifying the influence of urban sources on night light emissions[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 204: 103936.

[32] 盖兆雪,郑文璐,王洪彦,等. 气候变化下黑土区陆地生态系统碳储量时空格局与模拟[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 303 – 316.
GAI Zhaoxue, ZHENG Wenlu, WANG Hongyan, et al. Spatio-temporal pattern and simulation of terrestrial ecosystem carbon storage in black soil region under climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 303 – 316. (in Chinese)

[33] LIU Qi, QIAO Jiajun, LI Mengjuan, et al. Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their drivers at different spatial scales in the Yellow River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168486.

[34] LI Sinan, LIU Wenzhan, AN Jie, et al. Agricultural space function transitions in rapidly urbanizing areas and their impacts on habitat quality: an urban-rural gradient study[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 99: 107019.

[35] HE Liujie, XIE Zeyang, WU Hanqing, et al. Exploring the interrelations and driving factors among typical ecosystem services in the Yangtze River economic belt, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119794.

[36] LYU Yuefeng, WANG Mengjing, ZOU Yinuo, et al. Mapping trade-offs among urban fringe land use functions to accurately support spatial planning[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149915.

[37] LI Shengkun, LI Xiaobing, DOU Huashun, et al. Integrating constraint effects among ecosystem services and drivers on seasonal scales into management practices[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107426.

[38] WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 – 134.

[39] ZHU Ziyi, PENG Shuangyun, MA Xiaoliang, et al. Identification of potential conflicts in the production-living-ecological spaces of the Central Yunnan Urban Agglomeration from a multi-scale perspective[J]. Ecological Indicators, 2024, 165: 112206.

[40] 赵胜楠,王宇,乔旭宁,等. 1987—2021 年淮河流域 FVC 时空变化与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 180 – 190.
ZHAO Shengnan, WANG Yu, QIAO Xuning, et al. Spatiotemporal variation and driving factors for FVC in Huaihe River basin from 1987 to 2021[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 180 – 190. (in Chinese)

[41] WANG Liye, ZHENG Weiwei, TANG Lanping, et al. Spatial optimization of urban land and cropland based on land production capacity to balance cropland protection and ecological conservation[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285: 112054.