

DOI: 10.20103/j.stxb.202402190348

向芳芳,何风琴,黄丽萍,陈荣清.快速城镇化地区国土空间碳汇冲突评价及其异质性分析——以京津冀城市群为例.生态学报, 2024, 44(23): 10676-10687.

Xiang F F, He F Q, Huang L P, Chen R Q. Intensity evaluation and heterogeneity analysis of territorial spatial carbon sink conflicts in rapidly urbanized regions: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei city cluster, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10676-10687.

快速城镇化地区国土空间碳汇冲突评价及其异质性分析

——以京津冀城市群为例

向芳芳^{1,2}, 何风琴³, 黄丽萍^{1,2}, 陈荣清^{1,2,*}

1 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013

2 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 南昌 330013

3 江西飞行学院, 南昌 330038

摘要: 空间碳汇冲突是空间生态冲突的具体表现形式之一, 对其进行科学评价是识别区域碳平衡的有效途径, 也是实现“双碳”目标的有力支撑。以京津冀 199 个县域为研究对象, 借助景观风险评价方法, 考虑外部压力、暴露程度和稳定性三类因子, 构建了国土空间碳汇冲突强度评价模型, 并通过空间自相关进行了异质性分析。研究表明: ①研究区空间碳汇冲突结构整体配置趋于失衡, 且空间碳汇冲突加剧了区域碳源和碳汇空间配置失衡; ②空间碳汇冲突指数以中部首都为核心, 以同心圆形式向外逐渐减小, 呈现中东部高, 北部、西部及南部低的分布特征; ③京津冀城市群空间碳汇冲突受生态资源、土地利用开发强度和邻域空间功能外溢等多重影响, 呈现显著的空间集聚性特征, 冷点区集中分布在发挥重要生态保育功能的北部和南部, 热点区集中分布在经济发展重点区的中东部; ④对于京津冀城市群碳汇冲突管理, 需要以濒临失控的城市单元作为管控核心区, 并重视分区管理与跨区域联动监测, 应当基于全域视角搭建跨区域联动碳减排机制, 将“双碳”目标合理分解到不同行政单元, 统筹推进国土空间持续低碳开发利用。研究结果可为快速城镇化地区的国土空间碳汇冲突缓解及碳平衡协同管理工作提供现实参考。

关键词: 京津冀城市群; 景观风险评价; 空间冲突; 空间生态冲突; 碳汇功能; 异质性

Intensity evaluation and heterogeneity analysis of territorial spatial carbon sink conflicts in rapidly urbanized regions: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei city cluster, China

XIANG Fangfang^{1,2}, HE Fengqin³, HUANG Liping^{1,2}, CHEN Rongqing^{1,2,*}

1 School of Surveying, Mapping and Spatial Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2 Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China

3 Jiangxi Flight University, Nanchang 330038, China

Abstract: The spatial carbon sink conflict represents a specific facet of spatial ecological conflicts, and scientifically evaluating it constitutes a valid approach to identify regional carbon balance and provide strong support for attaining the “dual carbon” goal. This study focuses on 199 counties within the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) city cluster. An evaluation model is constructed for measuring the intensity of spatial carbon sink conflict employing an ecological risk model that considers the external pressure, exposure degree and stability. Additionally, spatial autocorrelation is adopted to analyze the

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41261041)

收稿日期: 2024-02-19; 网络出版日期: 2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 420888709@qq.com

heterogeneity of the spatial layout. The results show that: ① The distribution of spatial carbon sink conflict in the study area exhibited an overall imbalance, which has further exacerbated the imbalance in the allocation of carbon sources and sinks; ② The index of spatial carbon sink conflict is concentrated around the central capital and diminishes progressively as one moves outward in concentric circles, demonstrating a distribution pattern with higher values in the central east and lower values in the north, west, and south; ③ The spatial carbon sink conflict in the BTH city cluster is influenced by various factors including ecological resources, land use development intensity, and spillover of neighborhood spatial functions, demonstrating significantly spatial clustering characteristics. The cold spots are concentrated in the north and south of the area that plays an important ecological conservation function, while the hot spots are concentrated in the central and eastern regions of key economic development areas; ④ In order to effectively manage the carbon sink conflict in rapidly urbanized regions of the BTH, it is essential to prioritize urban units that are on the verge of being out of control as core areas of control. This should be accompanied by the implementation of management zoning and cross-regional linkage monitoring. And it is necessary to establish a cross-regional linkage carbon emission reduction mechanism from a global perspective. The “dual carbon” goal should be reasonably decomposed into different administrative units, and the sustainable low-carbon development and utilization of regional territorial space should be promoted in an integrated way. The results of this study can serve as a realistic reference for the mitigation of territorial spatial carbon sink conflict and the synergistic management of carbon balances in rapidly urbanizing areas.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei city cluster; the ecological risk model; space conflict; spatial ecological conflict; carbon sink; heterogeneity

20 世纪,我国城镇化、工业化成果显著,2020 年全国城市化水平达 63.89%,未来 20—30 年我国仍将进一步加快城市化进程,预计 2050 年达到 80%左右^[1],随着城镇化发展步入中后期,城市群将成为国家经济增长的主要支撑点^[2]。城市群地区发展迅速,人类国土空间开发利用活动与生态系统功能要素之间的交互影响愈加剧烈^[3],容易引发区域空间格局和功能的不协调,加剧空间冲突的产生,进而诱发一系列的负面影响,如空间资源分配失衡、空间开发停滞、社会发展失序等^[4-5]。碳排放具有明显的空间依赖性,国土空间作为生态系统中碳源和碳汇的核心载体^[6-7],将国土空间冲突与生态系统碳汇功能相结合,探究碳汇功能视角下国土空间冲突的作用机制,科学评价国土空间碳汇冲突强度,对强化快速城镇化地区国土空间碳汇冲突管理,推进国家“双碳”目标的实现具有意义重大。

“冲突”一词最先出现在社会学领域^[8],随着人类对自然资源开发强度的加大,“土地利用冲突”“国土空间冲突”等相关研究相继展开,用以解决由空间资源利用产生的社会经济冲突和生态环境冲突等问题^[9]。目前学术界关于国土空间冲突的研究主要涵盖了冲突概念内涵^[10-11]、表现形式与分类^[4, 12]、强度识别与诊断^[13-14]、产生机制^[10, 15]、动态演变^[16]以及调控管理^[17]六个方面。国土空间冲突的本质在于空间资源稀缺性、利用方式多宜性和功能效益外溢作用下产生的资源分配的对立,是一种客观的地理现象^[3-4]。周国华等学者^[4]根据利用目标的不同,结合人类依赖空间资源产生的生存、生产和发展需求的差异,将空间冲突分为空间经济冲突、空间社会冲突、空间生态冲突和空间复合冲突四类。

随着中国社会经济迈入高质量发展,一系列面向国家生态文明建设需求的重要部署相继展开,越来越多的学者注重从空间生态冲突视域解析国土空间绿色开发和可持续利用问题。空间生态冲突是指空间资源开发利用过程中注重短期效益而忽略长期可持续发展,进而产生生态效益的空间冲突^[4],主要表现为生态系统空间资源的竞争利用引起的生态系统稳定性下降、服务功能效益降低及供需失衡等现象^[18]。目前,国内外学者在空间生态冲突相关研究上取得的成果主要分为空间冲突结合生态系统服务^[3, 19]、生态重点区域保护^[20]及环境质量评价^[21]等方面。其中,关于空间生态冲突测度方法,学者们多借鉴景观指数和倒“U”型理论量化区域空间冲突强度^[14],或者通过分析空间用途与利用价值的相容性,测度潜在的空间冲突^[22];在空间生态冲

突研究内容上,多数学者聚焦宏观规划视角,研究成果集中在以生态安全格局出发的“三生空间”冲突优化^[23-24]、区域生态空间冲突调控^[25-26]、国土空间优化配置^[13, 27]等方面。既有研究能够有效揭示区域空间生态冲突结构特征和冲突影响结果,相比之下,从微观利用视角出发,探讨不同地类空间对具体类型生态系统服务功能要素的竞争性利用^[28]相关的研究成果较少。考虑到将空间冲突与具体的生态系统服务功能相结合,有利于直接实现区域生态系统的平衡管制,并且,土地利用变化影响土地碳排放效应在不同空间上的作用情况,一旦空间资源分配产生矛盾,区域生态系统碳平衡即会受到影响。由此,将国土空间开发利用中,生态系统碳源增加、碳汇功能受到弱化甚至丧失的现象视为国土空间碳汇冲突,可归属于国土空间生态冲突范畴。研究认为在“双碳”战略背景下,结合现有国土开发过程中碳排放相关研究成果,科学评价国土空间碳汇冲突,并通过空间碳汇存在的冲突问题揭示出国土空间利用过程中碳源/汇分布特征以及对碳平衡造成的影响,对于实现区域土地利用低碳开发具有重要现实意义。

随着京津冀城市群经济快速发展,土地利用规模和强度不断加大,生态系统要素的活跃度与流动性增强,国土空间开发过程中面临的景观碳汇风险等生态环境问题日益暴露^[29],迫切需要加强区域碳汇冲突统筹管理。因此,本文从国土空间冲突与生态系统碳汇功能结合的视角出发,梳理空间碳汇冲突形成机理,借鉴景观风险评价方法,开展区域国土空间碳汇冲突强度评价及空间异质性分析,有效识别区域空间碳汇冲突范围,为国土空间低碳发展的空间优化提供理论参考。

1 研究区概况及基础数据

1.1 研究区概况

京津冀城市群位于环渤海核心地带,地处 113°52'—119°85'E、36°03'—42°62'N 之间,总面积约 21.63 万 km²,地域空间包括北京、天津和河北省(石家庄、保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊坊、秦皇岛、唐山、邢台、张家口)在内的共 13 个地级市,下辖 199 个县级行政区。作为我国的“首都经济圈”,京津冀城市群人口活动密集,社会经济发展迅速,城镇化水平高,第七次全国人口普查结果显示,2020 年常住人口约为 1.1 亿,GDP 达到 8.64 万亿元。研究区以林地和耕地为主^[30],从东南到西北呈现种植业向林牧业用地过渡的分布格局,一定程度上保障了生态系统稳定和粮食安全。随着经济发展和城市化快速推进,京津冀地区国土空间开发建设活跃度不断加大,剧烈的土地利用/覆被变化带来了资源环境承载力弱化、人地矛盾突出等一系列问题^[31],进一步激化了区域空间的布局冲突。在“双碳”战略背景下,如何推动区域内联动减排和碳中和、提升区域景观碳汇潜力,是京津冀可持续协同发展的重要内容。

1.2 基础数据来源及处理

研究数据主要包括社会经济数据、基础地理信息数据和土地利用遥感数据等。社会经济数据主要源自北京、天津、河北统计年鉴以及政府公报等;基础地理信息数据中行政区划来源于中国科学院资源环境科学数据中心,区域主要水系、路网及行政中心等数据来源于 OpenStreetMap(OSM);北京市、天津市和河北省 2020 年土地利用遥感数据来源于分辨率为 30m * 30m 的 GlobeLand30 地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com>)。结合区域土地利用实际情况及研究目的将研究区的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类(图 1)。

2 理论框架与研究方法

2.1 国土空间碳汇冲突形成机理

空间资源具有供给有限性、用途多宜性和功能外溢性等内在特性,在不同的目标引导下,空间资源开发利用过程中会产生经济、生态或社会冲突^[4]。碳汇功能作为陆地生态系统服务功能中的重要功能之一,土地利用变化影响景观碳汇空间结构,国土空间碳汇冲突可归属于国土空间生态冲突范畴。碳汇功能空间的减少是形成空间碳汇冲突的外在客观原因,国土空间资源具有供给有限性,同一区域内建设用地与生产保障或生态

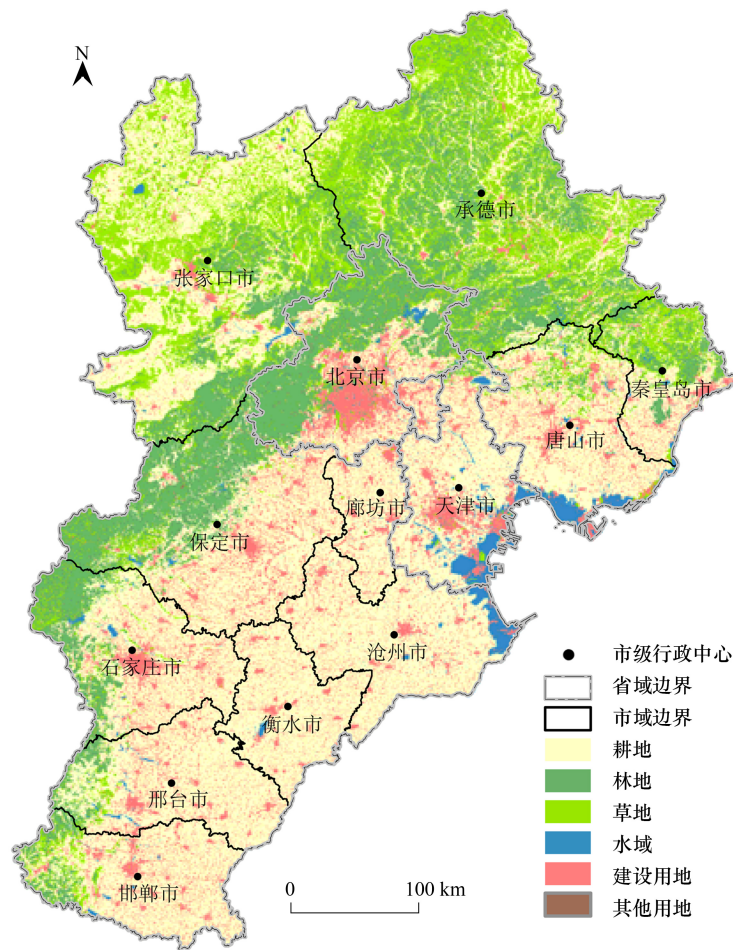


图1 京津冀区位及2020年土地利用类型分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of BTH location and the land use type distribution in 2020

保护用地的需求结构失衡,引起空间冲突产生^[5],如作为碳源的建设用地扩张,侵占林地、草地、水域等具有碳汇功能的生态空间,直接影响区域碳汇空间布局稳定,生态系统碳汇服务功能降低、供需平衡受到干扰^[32-33]。国土空间开发过程中的价值博弈是形成空间碳汇冲突的内在根本原因^[22],国土空间用途多宜性与人类需求的多样性使得开发利用存在潜在冲突,一方面为支撑经济发展建设用地增加,另一方面为满足粮食安全与生态安全又需要确保一定质量的生产用地和生态用地,此时,以国土空间资源为核心的要素竞争和数量分配过程中出现的利用目标与价值效益的不一致^[8],决定了国土空间开发利用过程中伴随着生态系统服务价值与社会经济价值的博弈。国土空间功能具有外溢性,相邻各类空间要素的功能溢出影响碳源和碳汇空间的规模、结构和布局^[3],对原有的碳循环局势造成干扰,加剧碳源空间与碳汇空间的配置失衡,是形成空间碳汇冲突的重要驱动因素。因此,本文认为空间碳汇冲突是空间生态冲突范畴内的一种区域生态系统服务功能冲突,其本质是空间资源的供给有限性、用途多宜性和功能外溢性引起的碳源空间与碳汇空间对空间资源的竞争性使用,具象地表现为土地利用变化过程中,生态系统碳源增加、碳汇功能受到弱化甚至丧失的现象^[19, 34],加剧土地利用碳排放相关的生态风险。

“双碳”目标下的国土空间开发利用,应注重研究土地利用/覆被变化对区域碳汇景观功能的影响,避免由于无序开发利用导致的生态系统碳汇功能弱化,甚至进化为空间碳汇冲突失控的局面,造成区域景观生态脆弱化。本文基于空间冲突的产生原理,结合国土空间开发利用对空间碳汇功能的影响,梳理国土空间碳汇冲突形成机理(图2)。基于空间格局变化对区域碳汇空间规模、结构和布局的影响过程,以景观碳汇风险大

小表征国土空间碳汇冲突水平,借鉴生态风险评价模型,从风险源、风险受体以及风险效应三方面构建国土空间碳汇冲突测度指数模型,评估京津冀城市群空间碳汇冲突的作用强度。

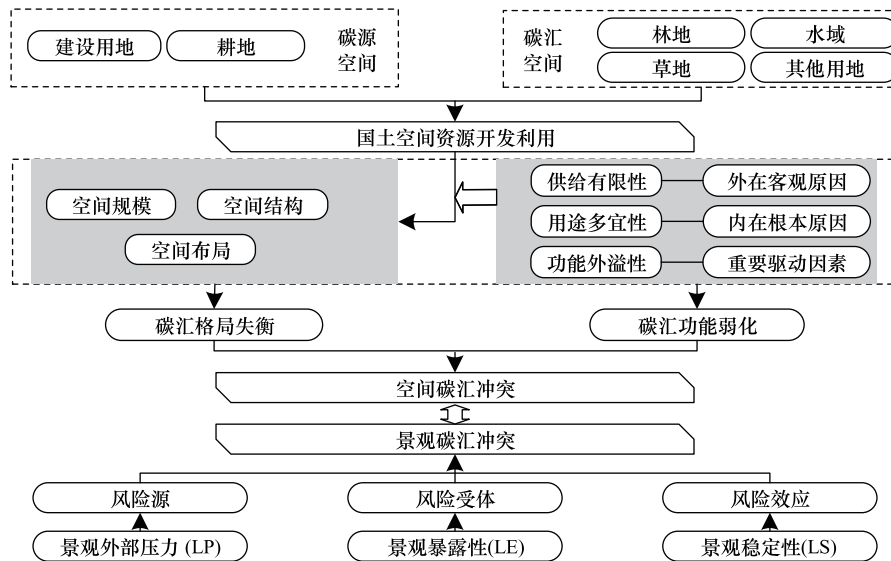


图2 京津冀城市群国土空间碳汇冲突形成机理图

Fig.2 Territorial spatial carbon sink conflict formation mechanism map

2.2 国土空间碳汇冲突测度模型

目前存在两种空间冲突测度模型构建的主流方法:一是基于生态学理论^[14],从景观复杂性、脆弱性及动态性角度出发,借用景观斑块的相互作用以及人类活动对景观斑块的影响反映空间冲突特征,可直接表现空间冲突结果引起的景观环境的变化;二是基于地理学理论^[35],从空间类型、格局及过程三个角度出发,侧重于反映地理空间结构比例、类型组合和相互转化过程导致的不协调。

结合研究需求,本文借鉴生态风险评价模型,以县级单元作为评价单元,从风险源、风险受体以及风险效应三方面构建国土空间碳汇冲突测度指数模型,并以景观外部压力与暴露性之和减去稳定性的差值进行表征^[8, 36]。参考吴蒙^[22]等学者的测度方法,选取目标单元与碳收支平衡最优状态的差距(即碳源与碳汇的差值)表示碳汇景观风险源;考虑到快速城镇化地区自然景观生态状况受道路、河流及城市建成区功能溢出的影响^[36],且越靠近此类空间的土地越容易转化为建设用地和农业用地等碳源空间^[37],又由于京津冀城镇空间沿水系及主要道路布局,选取景观单元到区域高速公路、五级以上河流、市级和省级行政中心的距离表示碳汇景观风险受体;选取景观百分比、斑块密度和平均邻近指数三个景观指数表示碳汇景观风险效应。

国土空间碳汇冲突公式表达为:

$$LCC = LP + LE - LS \quad (1)$$

式中, LCC 为区域国土空间碳汇冲突指数; LP 、 LE 、 LS 分别指景观外部压力、暴露性及稳定性。

(1) 景观外部压力(LP)

景观外部压力用以表征空间风险源,碳源与碳汇差值越大,表明净碳排放量越大,碳收支平衡距离最优状态越远。计算公式如下:

$$LP = \sum_{i=1}^6 A_i \times \mu_i \quad (2)$$

式中, A_i 为景观类型 i 的面积, i 取值1—6,依次表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和其他用地; μ_i 为景观类型对应的净碳排放系数。参考IPCC与碳排放相关研究成果^[29, 38],确定京津冀城市群耕地、建设用地碳排放系数分别为0.422和65.3t/hm²;耕地、林地、草地、水域及未利用地的碳吸收系数分别为0.007、0.623、0.144、

0.03和 0.05t/hm²。

(2) 景观暴露性(LE)

景观暴露性用以表征风险受体,反映空间景观受外界影响的难易程度,通过加权计算间接反映景观暴露性,受到影响越容易,暴露性越高,冲突水平越强。具体计算公式如下:

$$LE = 1 - \sum_{i=1}^n (m_1 D_{i1} + m_2 D_{i2} + m_3 D_{i3} + m_4 D_{i4}) \quad (3)$$

式中, D_{i1} 、 D_{i2} 、 D_{i3} 、 D_{i4} 分别表示第*i*个评价单元到区域高速公路、五级及以上河流、市级和省级行政中心的距离,*i*取值1—199; m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别表示4种空间类型的权重,参考相关文献研究^[30, 37],将京津冀城市群景观碳汇空间脆弱性受4种空间距离的影响度由小到大依次排列为:河流水系=1、主要道路=2、市级行政中心=3、县级行政中心=4,经过归一化处理后进行赋值,分别得到 $m_1=0.1$ 、 $m_2=0.2$ 、 $m_3=0.3$ 、 $m_4=0.4$ 。

(3) 景观稳定性(LS)

景观稳定性用以表征风险效应。景观指数通常可用来度量风险程度,生态系统碳汇服务功能效益很大程度上受景观格局变化的影响。公式如下:

$$LS = PLAND + PD + MPI \quad (4)$$

式中,PLAND 指景观百分比;PD 指斑块密度;MPI 指平均邻近指数。碳汇景观空间涉及耕地、林地、草地和水域。

最后,为了计算方便,把 LCC 中的数值标准到 0—1 内,根据倒“U”型理论^[14, 22],将国土空间碳汇冲突划分为(0,0.3)、(0.31—0.5)、(0.51—0.6)、(0.61—0.7)、(0.71—1)五个等级,分别对应稳定可控、基本可控、濒临失控、基本失控及严重失控五个冲突评价指标。

2.3 空间自相关分析

受区域土地利用变化影响,国土空间碳汇冲突指数显现典型的空间分异特征,可基于最常见的空间自相关方法 Moran's *I* 和 Getis-Ord G_i^* 从全局和局部对不同类型冲突的聚集性进行分析^[39]。

其中,Moran's *I* 公式^[40]如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]} \quad (5)$$

$$Z_{score} = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (6)$$

式中,*I*为全局空间自相关系数;*n*为研究个数; W_{ij} 代表*i*要素和*j*要素的权重; X_i 、 X_j 、 $\bar{X}$ 分别是第*i*个评价单元上的观测值、第*j*个评价单元上的观测值以及所有评价单元平均值; Z_{score} 指标化统计量的阈值; $E(I)$ 为观测变量自相关性的期望; $\text{var}(I)$ 为*I*的方差。

Getis-Ord G_i^* 公式^[41]如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_j W_{ij}(d) X_i}{\sum_j X_j} \quad (7)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{var}(G_i^*)}} \quad (8)$$

式中, $E(G_i^*)$ 和 $\text{var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 数学期望和方差; W_{ij} 为权重;*d*为第*i*和第*j*个要素之间的临界距离。当 $Z(G_i^*) > 2.58$ 时,表示显著的高值聚集;当 $Z(G_i^*)$ 介于 1.96—2.58 之间,表示较显著的高值聚集。

3 结果与分析

3.1 县域冲突强度等级及结构

根据公式(1)一(4),测算了研究区国土空间碳汇冲突指数(表1),结果显示2020年京津冀空间碳汇冲突指数平均值为0.51,稳定可控、基本可控、濒临失控、基本失控和严重失控冲突等级评价单元占比分别为14.57%、30.66%、21.61%、18.59%和14.57%,可控单元占45.23%,国土空间碳汇冲突结构整体趋于失衡状态。其中,处于冲突发生潜伏期濒临失控单元占比达到21.61%,这部分单元最容易发生态势转变,管理得当既能成为可控空间,但一旦防控不当,极易转向失控,是未来京津冀碳汇功能管控的重点区域。

表1 2020年京津冀国土空间碳汇冲突等级测算结果
Table 1 Estimation results of the spatial carbon sink conflict level of BTH in 2020

冲突等级 Conflict level	评价单元 Evaluation units	评价单元 占比 Ratio of evaluation units/%	冲突指数 平均值 Conflict index mean	冲突指数 标准差 Carbon source quantity	碳源总量 Ratio of carbon sources/ (10 ⁴ t/km ²)	碳源占比 Carbon sink quantity/%	碳汇总量 Ratio of carbon sink/ (10 ⁴ t/km ²)	碳汇占比 Ratio of carbon sinks/%	碳源/碳汇 Carbon source/ Carbon sink
稳定可控 Stable control	29	14.57	0.20	±0.0755	1934.80	10.82	192.21	58.92	10.07
基本可控 Basic control	61	30.66	0.40	±0.0573	4341.34	24.28	109.53	33.58	39.64
濒临失控 On the verge of being out of control	43	21.61	0.55	±0.0350	4226.33	23.63	6.16	1.89	686.38
基本失控 Basic out-of-control	37	18.59	0.65	±0.0297	3381.66	18.91	4.77	1.46	708.82
严重失控 Severely out of control	29	14.57	0.78	±0.0886	3997.66	22.36	13.53	4.15	295.57
总计 Total	199	100.00	0.51	±0.0886	17881.79	100.00	326.19	100.00	54.82

根据土地利用情况及不同地类碳排放系数,粗略计算区域碳源和碳汇的总量,并通过碳源与碳汇的比值衡量区域空间碳平衡状况,比值越高,碳平衡态势越恶劣,经汇总发现京津冀全域碳源与碳汇比值为54.82,在稳定可控、基本可控、濒临失控、基本失控和严重失控冲突等级空间单元下比值分别为10.07、39.64、686.38、708.82和295.57,表明研究区国土空间碳汇冲突强度与碳平衡度整体呈负相关关系。进一步分析不同冲突等级区域下碳排放效应具体情况,发现可控等级空间单元下碳源量为6276.14万t/km²,占比为35.10%,碳汇量为301.74万t/km²,占全域碳汇总量的92.50%;失控等级空间单元碳源量为11606.31万t/km²,占比为64.90%,碳汇量为24.46万t/km²,占比为7.50%。不难发现不同冲突等级下,景观空间碳源效益和碳汇效益差异明显,空间碳汇冲突加剧了区域碳源/汇空间配置失衡。

3.2 县域冲突强度分布格局特征分析

图3显示了研究区空间碳汇冲突产生过程中的景观外部压力指数(LP)、景观暴露性指数(LE)、景观稳定性指数(LS),以及空间碳汇冲突指数(LCC)测算结果。分析发现,研究区国土空间碳汇冲突强度的空间格局以中部首都为核心,以同心圆形式向外蔓延且冲突强度逐渐降低,整体表现为中东部区域高,北部、西部及南部区域低。失控等级评价单元主要分布在中东部区域的北京以南、天津、唐山、廊坊、保定东及石家庄;濒临冲突评价单元主要集中在东北部唐山,东南部石家庄、衡水和沧州;可控等级评价单元集中分布在北部秦皇岛、承德,西部张家口、保定西及石家庄西,南部邢台、邯郸以及中部北京以北。国土空间碳汇冲突强度异质性受空间外部压力、暴露性和稳定性三个指标的综合影响。

京津冀城市群从东南到中部到西北呈现种植业向工业向林牧业用地过渡的分布格局,北京、天津以第三

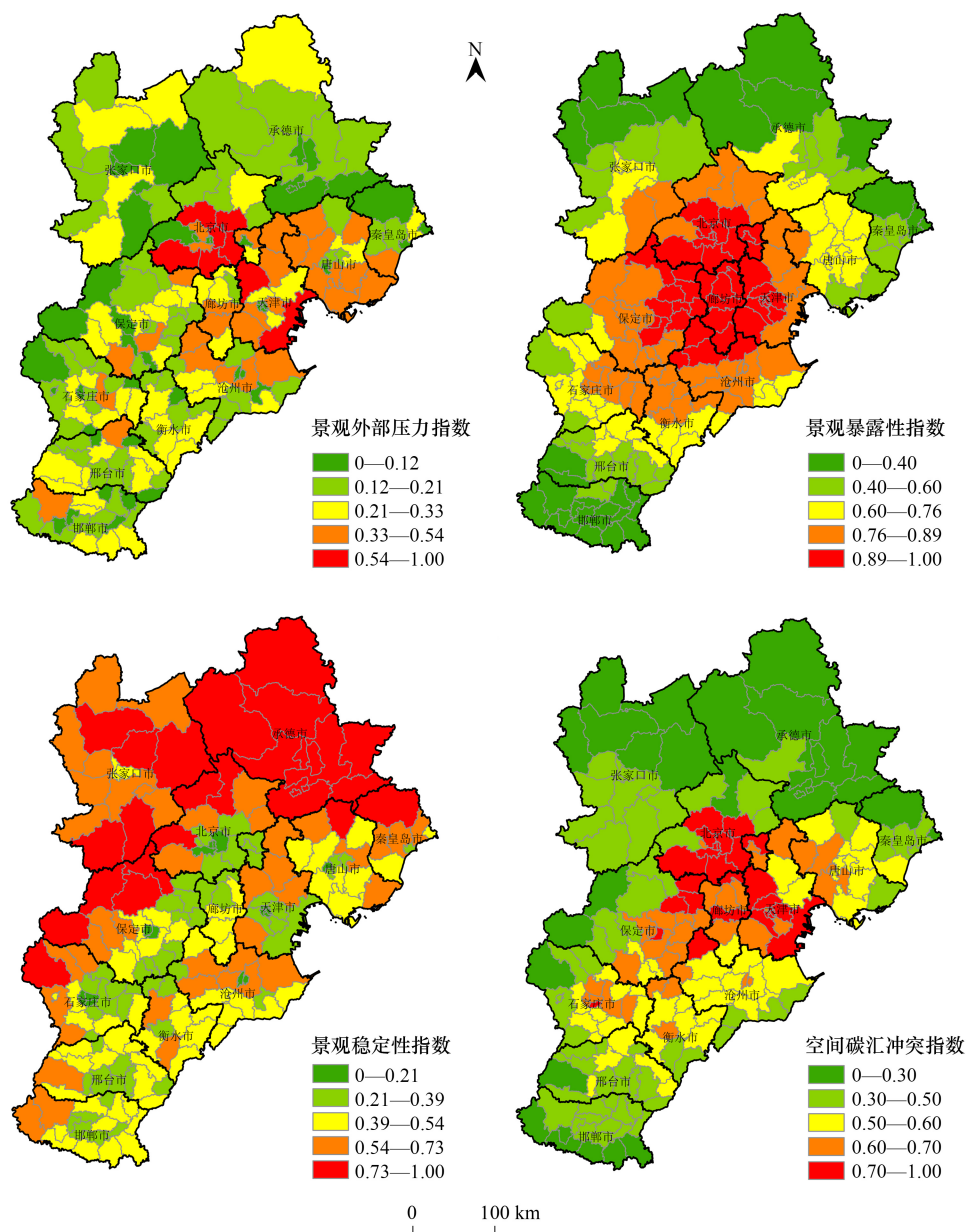


图3 京津冀县域国土空间碳汇冲突测度指数及冲突强度分布图

Fig.3 Territorial Spatial carbon sink conflict measurement index and conflict intensity distribution map at the county scale

产业为主,河北以第二产业为主,第三产业发展较慢,研究区内部用地格局及产业结构异质性较大,影响区域碳源、碳汇效应的差异性分布。失控等级评价单元主要分布在中东部经济发达程度高的区域,一方面随着京津冀协同发展战略实施,中部以首都为核心辐射的城市是经济发展主要布局点,城镇建成区聚集度高,碳排放增加而碳吸收能力下降,加剧干扰碳源、碳汇空间的平衡配置;另一方面,城镇化影响下区域土地利用变化活跃度上升,“三生空间”布局冲突矛盾加深,造成区域景观碳汇空间稳定性下降。濒临冲突评价单元主要集中在东北部和东南部,这部分地区处于平原地区,种植业较为发达,受中部核心城市辐射城镇化进程较快,一定程度上造成了碳源、碳汇空间配置失衡,但景观稳定性可观,空间碳汇冲突尚未达到失控程度,是未来低碳发展的重点防控区域。可控等级评价单元集中分布在北部西部和南部生境环境较好的区域,研究区西北部地势高,以山地丘陵为主,森林覆盖率高,相对东南平原地区城镇扩张阻力较大,减排增汇外部压力较小,景观暴露

性偏低,生态保护禀赋值高,景观稳定性冲击小,形成了天然的生态保护屏障。京津冀城市群国土空间碳汇冲突影响因素差异显著,可综合区域特征,从严格土地利用用途管制、控制空间碳排放强度、强化生态空间保护和修复能力以及优化产业结构等方面优化国土空间布局,进而推进国土空间持续低碳开发利用。

3.3 县域冲突指数空间自相关分析

对 2020 年京津冀城市群国土空间碳汇冲突结果进行 Moran's I 空间自相关假设检验,结果显示 P 值小于 0.01, Z 值为 17.64, 置信检验的结果可靠性强,全局 Moran's I 指数为 0.78, 表明空间碳汇冲突正相关性及聚集性特征较高。图 4 中相关性分布图显示, 高-高聚集共 45 个区县, 主要分布在中部和东部区域; 低-低聚集共 40 个区县, 主要分布在北部和南部区域; 仅有唐山域内迁安市、邢台域内襄都区两个单元呈现高-低聚集, 北京域内门头沟区呈现低-高聚集, 与相邻区域空间冲突类型呈现差异。高-高聚集和低-低聚集都反映了正相关关系, 表明京津冀国土空间碳汇冲突指数呈现显著正相关关系。

对 2020 年京津冀城市群国土空间碳汇冲突结果进行 Getis-Ord G_i^* 冷热点分析, 得到图 4 中的显著性分布情况, 结果与空间自相关显示的聚集趋势相符, 显示冷点区主要集中在北部和南部, 涉及秦皇岛、承德、张家口、邯郸和邢台域内, 这部分地区植被覆盖率高, 生态资源丰富, 发挥着重要的生态碳汇功能; 热点区主要集中在中东部, 涉及北京、天津、廊坊、保定、沧州以及石家庄、唐山和衡水部分区县, 作为发展重点区域, 这部分地区生态基底较为脆弱, 城市化和工业化程度高、人口聚集度和流动性大, 表明空间碳汇冲突强度受人类活动和相邻城市社会经济溢出作用的综合影响。

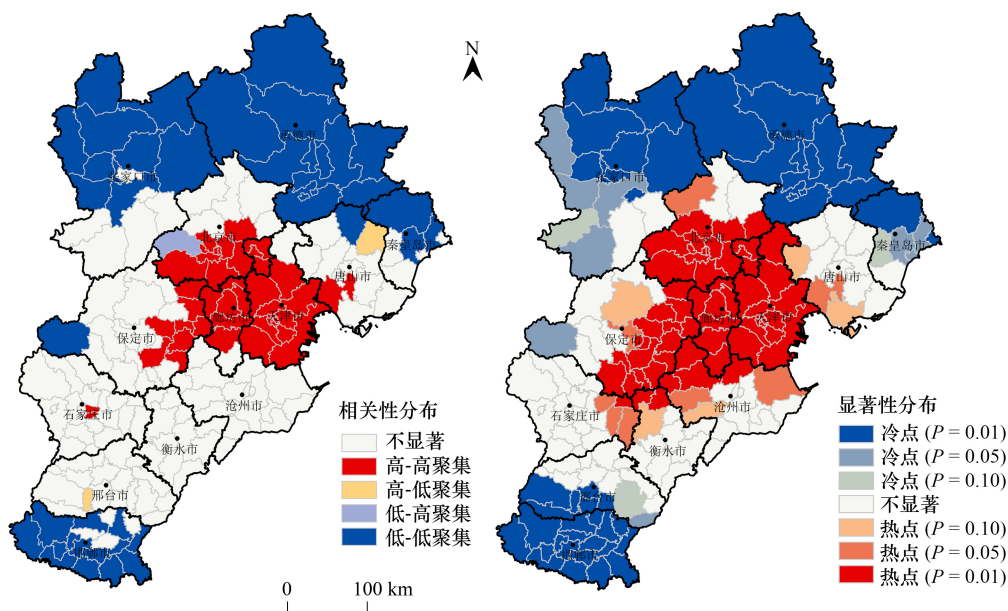


图 4 京津冀国土空间碳汇冲突相关性及其显著性分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of correlation and significance distribution of spatial carbon sink conflict

通过空间自相关分析发现快速城镇化地区国土空间碳汇冲突指数受到区域生态资源、土地利用开发强度和邻域空间功能外溢的多重影响。在推进京津冀协同发展的过程中既要注重中东部经济发展重点区域的空间布局优化,也要统筹加强北部、西部和南部的生态保护工作,这有利于促进大尺度上的跨区域碳收支平衡发展,形成京津冀城市群经济提升与低碳空间利用共同发展的可持续局面。

3.4 市域冲突强度分布格局特征分析

以京津冀城市群县域国土空间碳汇冲突评价结果为基础,借助面积加权法测算研究区 13 个市级行政单元的空间碳汇冲突指数,将计算结果标准化至 0—1 区间,并通过可视化得到市域冲突强度分布图(图 5)。

结果显示,研究区中东部冲突强度偏高,处于失控或濒临失控状态;西北部 and 西南部冲突强度偏低,处于

可控状态。具体表现为:天津冲突级别最高,处于严重失控状态;廊坊处于基本失控状态;北京、唐山、沧州和衡水处于濒临失控状态;保定、石家庄、邢台和邯郸处于基本可控状态;张家口、承德和秦皇岛处于稳定可控状态。分析发现,失控单元主要表现为经济较发达、自然资源禀赋较差,天津和廊坊都属于京津冀经济重心城市之一,域内多为工业用地,土地资源紧张,生态系统脆弱度高,且作为主要碳汇空间的林地占比率低,碳汇功能远弱于碳排功能。可控单元主要表现为与经济核心区有一定距离,生态环境质量优良,京津冀北部和西部大部分区域位于燕山山脉和太行山山脉,植被覆盖率高,属于重要的生态涵养区域,是京津冀碳汇功能的核心地带。

濒临失控单元主要分为两种情况,其一是京津冀核心市域的北京,区域经济发达、土地开发强度大,但同时部分区域生态基底良好,对空间碳汇冲突起到一定的调节作用,2020年北京城镇化水平高达87.5%,GDP占京津冀的41.8%,经济发展地位最高,但西北部森林覆盖率高,碳汇功能效益良好,一定程度上实现了空间碳汇冲突的自我调控;其二是唐山、沧州和衡水,这类评价单元靠近失控单元,城镇化进程相对平缓,生态基底一般,虽然面临低碳发展投资及管理方面的约束,但尚且能实现内部制衡。结合前文3.3关于县域单元空间碳汇冲突强度解析和相关性分析结果发现,区域空间碳汇冲突正相关性显著,失控状态的城市难以依靠自身实现城市碳平衡发展,缓解空间碳汇冲突困难。因此,随着城镇化战略进一步推进,濒临失控的城市单元是空间碳汇冲突管控的核心区域,务须强化冲突治理,避免此类单元演变为失控状态。

因此,发展区域低碳经济,不仅需要根据空间碳汇冲突强度分布情况在不同尺度下行政单元内部实施针对性的低碳管控策略,更应该以全域为视角,搭建跨区域联动碳减排和碳中和发展机制,探索建立区域间国土空间碳汇动态监测管理平台与横向补偿机制,进而将“双碳”目标合理分解到不同行政单元加以落实,统筹推进区域“双碳”目标的实现。

4 结论与讨论

4.1 结论

国土空间是生态系统中碳汇功能发挥的核心载体,本文创新地将国土空间冲突与生态系统碳汇功能相结合,研究国土空间冲突对景观碳汇功能的作用机制,评价京津冀城市群国土空间碳汇冲突水平,在强化跨区域空间碳汇冲突管理,引导京津冀协同发展下的低碳土地开发利用,推进“双碳”目标的实现等方面具有重要现实意义。研究结论表明:

(1)京津冀城市群国土空间碳汇冲突结构整体配置趋于失衡,稳定可控、基本可控、濒临失控、基本失控和严重失控冲突等级评价单元占比分别为14.57%、30.66%、21.61%、18.59%和14.57%;测算不同冲突等级空间单元下碳源与碳汇比值分别为10.07、39.64、686.38、708.82和295.57,可控等级空间单元碳汇占比达92.50%,失控等级空间单元碳源占比达64.90%,表明空间碳汇冲突加剧了区域碳源与碳汇空间配置失衡。

(2)京津冀城市群国土空间碳汇冲突强度格局分布具有明显特征,表现为以中部首都为核心,以同心圆

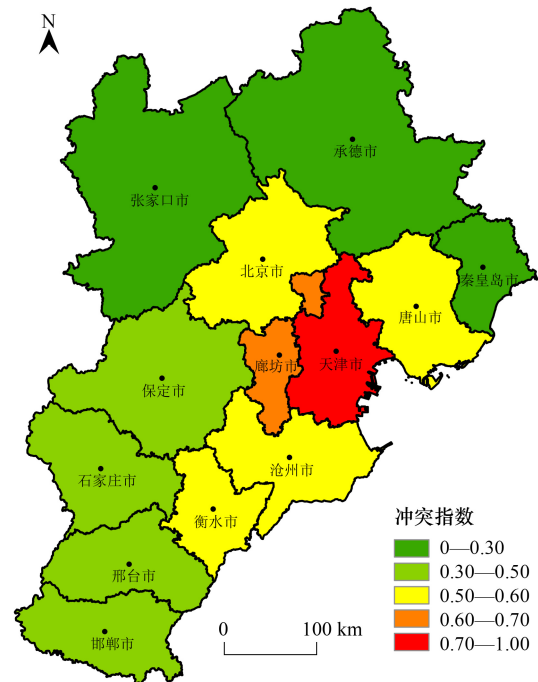


图5 京津冀市域国土空间碳汇冲突强度分布图

Fig.5 Territorial Spatial carbon sink conflict intensity distribution map at the municipal scale

形式向外逐渐降低,冲突指数较高的失控单元主要分布在经济发达程度高的中东部区域,可控单元主要分布在生境环境较好的北部、西部及南部区域。

(3)京津冀城市群国土空间碳汇冲突受生态资源、土地利用开发强度和邻域空间功能外溢等多重影响,呈现显著的空间集聚性特征。冷点区主要集中在北部和南部,发挥重要的生态保育功能;热点区主要集中在中东部,是经济发展重点区域。碳汇冲突热点区和冷点区分别呈现内围和外围的连片分布态势,并伴随着京津冀一体化发展,热点区逐渐向外扩散,在推进京津冀协同发展的过程中应当重视分区管理与跨区域联动监测,既要注重经济发展重点区域的布局优化,也要加强重要碳汇空间统筹保护工作。

(4)京津冀城市群 13 个市域单元中,失控单元占 46.15%,仍然集中在中东部核心经济发展区,但是基本失控和严重失控分别仅为天津和廊坊市,北京、唐山、沧州和衡水 4 个单元处于濒临失控,随着城镇化战略进一步推进,濒临失控的城市单元是空间碳汇冲突管控的核心区域,务须强化冲突治理,以避免其演化成失控状态。

4.2 讨论与展望

本研究将国土空间冲突与生态系统中微观的碳汇功能相结合,以国土空间碳汇存在的冲突问题为切入视角,揭示快速城镇化地区国土空间利用过程中碳源/汇分布特征以及碳平衡状况,意图为跨区域实现联动碳减排和碳中和发展、统筹推进“双碳”目标提供参考价值,但研究也存在一定局限性。①数据测算方法上,文章中碳汇/碳源总量测算主要依赖土地利用遥感影像分类数据和大尺度的碳排放系数,但实际上两者的效益发挥还受区域经济、社会因素影响,数据精准性存在一定欠缺;②分析过程方面,空间冲突的发生与演变是自然、经济、社会、文化等方要素复合作用引起的,但是本研究主要通过空间碳汇冲突指数的测算结果与土地利用现状进行叠加,分析空间冲突分布的影响因素,虽然也定性解释了其经济发展状态的响应,在一定程度上揭示了国土空间碳汇冲突产生的驱动因素,但结论侧重于地理空间识别,存在对内部人文、经济因素影响的考虑不足;③本文仅列举了在县域尺度或市域尺度上调节国土空间碳汇冲突、推进国土空间持续低碳开发利用的途径。

基于以上结论,未来对于碳源/汇的测算需要依靠更加科学的碳排放监测数据加以支撑,用以提高研究结果的精准性;需要进一步加强对冲突产生驱动机制的多维度定量化剖析;空间碳汇冲突分区优化方案及针对性的减排增汇战略措施也是未来研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 王凯,林辰辉,吴乘月.中国城镇化率 60%后的趋势与规划选择.城市规划,2020,44(12):9-17.
- [2] 方创琳.改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望.经济地理,2018,38(9):1-9.
- [3] 吴蒙,周冯琦,程进.基于生态系统服务的快速城市化地区空间冲突测度及时空演变特征.中国人口·资源与环境,2021,31(5):12-20.
- [4] 周国华,彭佳捷.空间冲突的演变特征及影响效应——以长株潭城市群为例.地理科学进展,2012,31(6):717-723.
- [5] 易丹,赵小敏,郭熙,韩逸,江叶枫,赖夏华,黄心怡.江西省“三线冲突”空间特征及其强度影响因素.自然资源学报,2020,35(10):2428-2443.
- [6] 黄贤金,张安录,赵荣钦,高菲,张鸿辉.碳达峰、碳中和与国土空间规划实现机制.现代城市研究,2022,37(1):1-5.
- [7] Keenan T F, Williams C A. The terrestrial carbon sink. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43: 219-243.
- [8] 于伯华,吕昌河.土地利用冲突分析:概念与方法.地理科学进展,2006,25(3):106-115.
- [9] 周德,徐建春,王莉.近 15 年来中国土地利用冲突研究进展与展望.中国土地科学,2015,29(2):21-29.
- [10] 谭术魁.中国土地冲突的概念、特征与触发因素研究.中国土地科学,2008,22(4):4-11.
- [11] Andrew J S. Potential application of mediation to land use conflicts in small-scale mining. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(2):117-130.
- [12] Pavón D, Ventura M, Ribas A, Serra P, Sauri D, Breton F. Land use change and socio-environmental conflict in the Alt Empordà county (Catalonia, Spain). Journal of Arid Environments, 2003, 54(3):543-552.
- [13] 陈竹安,冯祥瑞,洪志强,马彬彬,李亦佳.南昌市土地利用的空间冲突风险评估及分区优化研究——基于“三生空间”视角.世界地理研究,2021,30(3):533-545.
- [14] 彭佳捷,周国华,唐承丽,贺艳华.基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度——以长株潭城市群为例.自然资源学报,2012,27

- (9): 1507-1519.
- [15] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展. 地理科学进展, 2020, 39(2): 298-309.
- [16] Swanström N, Weissmann M. Conflict, conflict prevention and conflict management and beyond: a conceptual exploration. Central Asia-Caucasus Institute & Silk Road Studies Program, 2005.
- [17] 杨永芳, 刘玉振, 朱连奇. 土地利用冲突权衡的理论与方法. 地域研究与开发, 2012, 31(5): 171-176.
- [18] 王威, 胡业翠. 改革开放以来我国国土整治历程回顾与新构想. 自然资源学报, 2020, 35(1): 53-67.
- [19] 吕昌河, 程量. 土地利用变化与生态服务功能冲突——以安塞县为例. 干旱区研究, 2007, 24(3): 302-306.
- [20] 王琦, 王辉, 虞虎. 制度空间视角下自然保护区与人类活动的冲突与协调——以雅鲁藏布大峡谷自然保护区为例. 资源科学, 2022, 44(10): 2125-2136.
- [21] 吴一洲, 姚申益, 吴思琴, 吴婕, 蒋清清. 海岛城市生态安全格局构建与优化策略研究——以舟山本岛为例. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2693-2705.
- [22] 吴蒙, 王琳琳, 程进. 长三角城市群国土空间碳汇冲突测度及空间格局特征分析. 资源科学, 2022, 44(10): 2048-2059.
- [23] 罗天玥, 刘学军, 李静, 宋菊芳, 黄经南, 焦洪赞. 京津冀城市群生态空间冲突时空演变研究. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 88-92.
- [24] 韦江伟, 赵锐锋, 李玲慧, 贾志斌. 干旱区三生用地时空演变特征及空间冲突研究——以黑河中游地区为例. 水土保持研究, 2021, 28(4): 284-292, 419.
- [25] 苏伟忠, 马丽雅, 陈爽, 杨桂山. 城市生态空间冲突分析与系统优化方法. 自然资源学报, 2020, 35(3): 601-613.
- [26] 杨远琴, 任平, 洪步庭. 基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 322-332.
- [27] 戴智勇, 杨朝现, 信桂新, 魏耀华, 熊想想. 丘陵山区土地利用冲突评价及调控优化. 西南大学学报: 自然科学版, 2019, 41(11): 82-91.
- [28] Kangas K, Brown G, Kivinen M, Tolvanen A, Tuulentie S, Karhu J, Markovaara-Koivisto M, Eilu P S, Tarvainen O, Similä J, Juutinen A. Land use synergies and conflicts identification in the framework of compatibility analyses and spatial assessment of ecological, socio-cultural and economic values. Journal of Environmental Management, 2022, 316: 115174.
- [29] 卫晓庆. 京津冀地区土地利用碳排放特征及影响因素分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [30] 邱陈澜, 王彩侠, 章瑞, 冯悦, 张云路, 李雄, 王凯平. 京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征. 生态学报, 2022, 42(23): 9590-9603.
- [31] Ma W Q, Jiang G G, Chen Y H, Qu Y H, Zhou T, Li W Q. How feasible is regional integration for reconciling land use conflicts across the urban-rural interface? Evidence from Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region in China. Land Use Policy, 2020, 92: 104433.
- [32] 张正峰, 张栋. 基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区. 中国环境科学, 2023, 43(4): 2057-2068.
- [33] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [34] 白晓飞, 陈焕伟. 不同土地利用结构生态系统服务功能价值的变化研究——以内蒙古自治区伊金霍洛旗为例. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 185-187.
- [35] 贺艳华, 唐承丽, 周国华, 何胜, 邱永红, 石亮, 张浩中. 基于地理学视角的快速城市化地区空间冲突测度——以长株潭城市群地区为例. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1660-1674.
- [36] 李景刚, 何春阳, 李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究——以北京为例. 自然资源学报, 2008, 23(1): 33-47.
- [37] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果, 郑晓欣. 京津冀城市群景观格局变化机制与预测. 生态学报, 2017, 37(16): 5324-5333.
- [38] 王争光. 京津冀地区土地利用碳中和及国土空间优化研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- [39] Murtadho A, Pravitasari A E, Munibah K, Rustiadi E. Spatial distribution pattern of village development index in Karawang Regency using spatial autocorrelation approach. Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota, 2020, 16(2): 102-111.
- [40] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [41] Anselin L. Exploring spatial data with geodarm: a workbook, 2005.