

北部湾城市群土地利用碳收支时空分异及碳补偿分区

王政强¹, 覃盟琳^{2,3}, 唐世斌¹, 赵胤程², 庞雅月¹, 龚苑红¹

(1.广西大学 林学院, 广西 南宁 530004; 2.广西大学 土木建筑工程学院,
广西 南宁 530004; 3.广西大学 土木建筑工程学院 人居环境设计研究中心, 广西 南宁 530004)

摘要: [目的] 分析市域空间尺度对城市群碳收支时空格局演变特征及耦合协调关系, 构建碳补偿分区评价体系, 为实现碳中和目标提供城市群层面的实施策略参考。[方法] 以北部湾城市群为例, 在分析 2000, 2010, 2020 年研究区土地利用碳收支时空分异及耦合协调度分析的基础上, 结合熵权法和 TOPSIS 法测算 2020 年 15 个城市碳补偿贴适度, 构建碳补偿综合评价体系并引入三维魔方单元模型初步构建碳补偿等级进行功能分区研究。[结果] ①2000—2020 年北部湾城市群碳收支量呈现整体上升状态, 市域尺度主体碳排放区域呈现“核心—外围”结构, 主体吸收区域呈现“倒钩”状空间格局。②2000—2020 年该城市群碳源、碳汇在分异格局上, 除广西区域呈现西北—东南方向, 其余地区均呈现东北—西南为主导的方向, 空间分布重心稳定。③2000—2020 年城市群内部碳源与碳汇坐标均高于 0.5, 碳排放与碳吸收水平较高, 两者具有较高的耦合协调性。[结论] 北部湾城市群的碳收支存在明显的时空异质性, 碳排放与碳吸收耦合协调程度较高。为了进一步探索实现“双碳”目标多元化路径, 北部湾城市群未来应多方面考虑区域资源能力、碳排放强度和经济发展条件等, 从而健全城市群区域间碳补偿体制。

关键词: 碳收支; 时空分异; 碳补偿; 北部湾城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0348-12

中图分类号: X321

文献参数: 王政强, 覃盟琳, 唐世斌, 等. 北部湾城市群土地利用碳收支时空分异及碳补偿分区[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 348-359. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220829.001; Wang Zhengqiang, Qin Menglin, Tang Shibin, et al. Spatio-temporal variation of landuse carbon budget and carbon compensation zoning in Beibu Gulf urban agglomeration area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 348-359.

Spatio-temporal Variation of Landuse Carbon Budget and Carbon Compensation Zoning in Beibu Gulf Urban Agglomeration Area

Wang Zhengqiang¹, Qin Menglin^{2,3}, Tang Shibin¹, Zhao Yincheng², Pang Yayue¹, Gong Yuanhong¹

(1.College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2.College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3.Habitat Design Research Center, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The evolution characteristics and coupling coordination relationship between the spatial scale of cities, and the spatiotemporal pattern of the carbon budget in urban agglomeration areas were analyzed, and a regional evaluation system for carbon compensation was constructed in order to provide a reference for implementing strategies at the urban agglomeration level to achieve the goal of carbon neutrality. [Methods] Based on an analysis of the spatial and temporal variation of land use carbon income and expenditure and the coupling coordination degree in the Beibu Gulf urban agglomeration area in 2000, 2010, and 2020,

收稿日期: 2022-05-23

修回日期: 2022-07-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“北部湾城市群空间协同发展低碳效应及规划研究”(51768001)

第一作者: 王政强(1997—), 男(汉族), 江苏省溧阳市人, 硕士研究生, 研究方向为低碳规划设计。Email: 826257437@qq.com。

通信作者: 唐世斌(1963—), 男(汉族), 重庆市梁平人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事风景园林建筑工程与规划设计研究。Email: tshibin@163.com。

the entropy weight method and TOPSIS method were combined to measure the carbon compensation closeness of 15 cities in 2020 in order to construct a comprehensive evaluation system of carbon compensation and to introduce a three-dimensional magic square unit model to initially construct carbon compensation levels for functional zoning research. [Results] ① From 2000 to 2020, the carbon balance of the Beibu Gulf urban agglomeration showed an overall increase, the main carbon emission area at the municipal scale showed a “core-periphery” structure, and the main absorption area has shown a “barb” spatial pattern. ② From 2000 to 2020, the carbon sources and sinks in the Beibu Gulf urban agglomeration area showed a northwest-southeast direction, except for the Guangxi region that showed a northeast-southwest dominant direction, with a stable spatial distribution center of gravity. ③ From 2000 to 2020, the coordinates of carbon sources and carbon sinks in the urban agglomeration area were greater than 0.5. Furthermore, the level of carbon emission and carbon absorption were high, showing relatively high coupling coordination. [Conclusion] There was obvious spatio-temporal heterogeneity in the carbon budget of the Beibu Gulf urban agglomeration, and the degree of coupling coordination between carbon emissions and carbon absorption were high. In order to further explore diversified paths to achieve the “double carbon” goal, regional resource capacity, carbon emission intensity, and economic development conditions should be considered in the future so that the inter-regional carbon compensation system of urban agglomeration areas can be improved.

Keywords: carbon balance; spatial and temporal divergence; carbon compensation; Beibu Gulf urban agglomeration

“2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和”的宏观目标对城市群建设与未来发展提出新要求。城市温室气体排放控制力度亟需加强,碳源排放需要控制,碳汇潜力的估算与增汇固汇护汇成为国土空间整体建设的主流方向。当前中国经济集群化、产业化发展倾向明显,以城市群为主体的区域发展战略使城市群成为碳排放的重要单元。

湾区城市群作为人口和经济活动高度集聚的地区^[1],在快速工业化和城镇化的驱动下,将不可避免地导致环境污染和碳排放^[2-3]。国内外相关研究表明碳源碳汇的演变与土地利用格局的变化有强相关性^[4],对于土地利用变化引起的碳源碳汇变化,目前已有相关研究主要集中在国家层面、区域层面和县域层面,研究角度包括碳收支核算^[5],碳收支的时空分异^[6],土地利用的碳排放效应^[4,7-8],碳源碳汇的时空格局分析等^[9]方面,大量研究考虑碳排放的空间效应,分析机理与相关性,以提高碳排放效率。国内碳补偿的概念脱胎于生态补偿^[10],是碳排地区对碳汇地区给予经济或非经济补偿的行为。碳补偿的研究视角较为广泛,各领域的学者从补偿制度视角^[11-12]、空间效应视角^[13]、行为视角等^[14]进行了研究,当前对碳补偿的空间视角研究处于热门阶段,主要针对省域^[15]、都市圈^[6]、县域^[5]以及森林与耕地生态系统等^[16]层面作为研究对象。

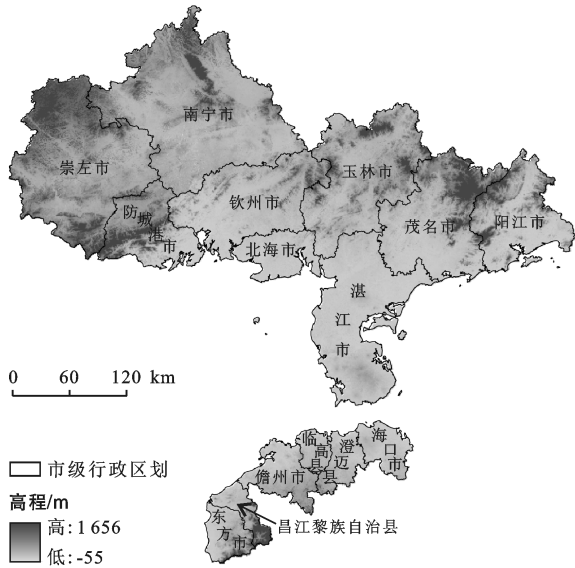
由于不同地域的碳源碳汇格局演变情况差异较大,而现有研究对热带沿海城市群碳收支研究较为缺

乏。并且,现有研究构建的碳平衡与碳补偿导向的低碳评价指标体系^[17]过于复杂,指标选取倾向不同,执行难度大,可比性较低,因此制定一个简单明确的碳功能分区评价标准能够将减排增汇的工作明确落实到应用层面。近日国务院批复同意《关于北部湾城市群建设“十四五”实施方案》,要求积极拓展全方位开放合作,大力发展向海经济,加快建设蓝色海湾城市群,北部湾城市群作为为数不多的热带沿海城市群,是一个合适的研究对象。本文以北部湾城市群为例,从市域空间尺度对城市群碳收支时空格局演变特征及耦合协调关系进行详细分析,构建碳补偿分区评价体系并对区域碳补偿分区进行探讨,为实现碳中和目标提供城市群层面的实施策略参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

北部湾城市群陆地区域位于:106°33′—112°21′E, 18°43′—23°32′N(图 1)面积 $1.17 \times 10^5 \text{ km}^2$,于 2017 年由国家批复成立,包括广东省的 3 个城市:茂名、阳江、湛江,广西壮族自治区的 6 个城市:南宁、北海、钦州、防城港、崇左、玉林,海南省的 6 个城市:海口、儋州、临高、澄迈、东方、昌江。城市群被北部湾海域分割为 3 部分,拥有漫长的海岸线。地势复杂多变,北部山地较多,南部相对平坦。气候湿润炎热多雨,处于亚热带与热带季风气候区,有着丰富多变的植被环境。北部湾城市群处于国家划定的“一带一路”中“陆海新通道”的战略出海口位置,地理区位优势。



注:基于标准地图_审图号 GS(2022)1873 制作 <http://xzqh.mca.gov.cn/map>。

图 1 北部湾城市群行政边界与地形示意图

1.2 数据来源

土地利用数据来源为 Globeland30 (<http://www.globallandcover.com/>), 空间分辨率 30 m, 时间节点为 2000, 2010, 2020 年 3 期, 覆被类型经重分类后得到耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 类; 地形数据来源为地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>), 空间分辨率 30 m; 社会经济能源数据主要来源于 2000, 2010, 2020 年的《中国城市统计年鉴》《广西统计年鉴》《广东统计年鉴》《海南统计年鉴》, 以各市县统计年鉴与地方政府统计公报做补充; 矢量行政界线数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn>) 和全国行政区划信息查询平台 (<http://xzqh.mca.gov.cn/map>)。

1.3 研究方法

1.3.1 城市群碳收支时空分异与耦合协调度模型构建

(1) 土地利用碳收支核算。对各土地利用类型赋予特定的碳排放系数以便计算相应地类的碳排放(吸收)量, 将区域土地利用碳收支分为经济社会活动的碳源排放, 以及自然生态系统的碳汇吸收两个方面。对于建设用地以外的地类, 碳排放量及碳吸收来源相对稳定可控, 因此采用已有研究成果中的碳效应系数值乘以地类面积得到各地类的碳排放(吸收)量, 其计算公式为:

$$C_e = T_e \cdot \delta_e \quad (1)$$

式中: C_e 为该土地利用类型的碳排放或碳吸收量; T_e 为土地利用类型 e 的土地面积; δ_e 为该土地利用类型的碳效应系数, 排放为正数, 吸收为负数。参考

翻阅大量相关研究(表 1)文献^[4,6-9,18]后, 发现大多研究认为耕地^[19]农作物的碳汇能力不明显, 因此耕地和建设用地是碳排放的主要来源。根据彭文甫等^[18]、赖力^[20]、方精云等^[21]、肖红艳等^[22]的研究, 林地、草地、水域、未利用地是碳汇地类。

建设用地的碳排放量受土地面积与化石能源消费量的影响, 因此需要通过化石能源转换为标准煤的转换系数和相应碳效应系数估算建设用地碳排放量。化石能源标准煤转换系数参考《中国能源统计年鉴》, 碳效应系数参考 IPCC《国家温室气体排放清单指南》。土地利用结构与能源消耗碳排放具有极强的关联度, 有学者测算出土地利用的能源消耗碳排放的变化中建设用地在能源消耗碳排放的规模变化中起主要作用, 两者变化的同步性很高^[23-24]。因此, 建设用地的碳排放(E_B)可通过其利用过程中能源消耗的碳排放系数间接估算^[25], 根据研究区实际化石能源消耗情况, 建设用地碳排放计算公式为:

$$E_B = C_i \cdot \gamma_i \cdot \delta_i = C_i \cdot \gamma_i \cdot \frac{1}{3} (\delta_c \cdot \delta_p \cdot \delta_n) \quad (2)$$

式中: E_B 表示建设用地碳排放量; C_i 为能源消耗总量; γ_i 表示标准煤转换系数; δ_i 为能源消耗碳排放系数 $\delta_c, \delta_p, \delta_n$ 分别是煤品燃料、油品燃料和天然气的碳排放系数。

表 1 用地及化石燃料的碳源(汇)碳排放(吸收)系数

名称	参数值(以 C 计)	数据来源
林地碳汇系数	-0.581 0 kg/(m ² ·a)	方精云等 ^[21]
草地碳汇系数	-0.020 5 kg/(m ² ·a)	
水域碳汇系数	-0.025 3 kg/(m ² ·a)	赖力 ^[20]
未利用地碳汇系数	-0.000 5 kg/(m ² ·a)	彭文甫等 ^[18]
耕地碳源系数	0.459 5 kg/(m ² ·a)	Tsuruta, et al ^[19]
煤炭碳源系数	0.732 9 t/t	
石油碳源系数	0.557 4 t/t	赵荣钦等 ^[25]
天然气碳源系数	0.442 6 t/t	

(2) 碳收支演变与耦合协调距离模型构建。基于自然断点法、标准差椭圆分析以及重心迁移模型, 分析市域碳排放量与碳吸收量随时间变化的空间分布情况。其中, 利用自然断点法取 2000—2020 年北部湾城市群碳排放量和碳吸收量均值的 50%, 100%, 150% 和 200%, 将碳排放量和碳吸收量划分为低、中低、中、中高和高 5 个等级^[26], 以便可视化参照; 利用标准差椭圆衡量地理要素分布特征和时空演变^[27], 椭圆长轴分析数据分布朝向, 面积分析集聚性大小; 其次, 利用重心迁移模型^[27]揭示不同时期某一要素在空间演变过程中的转移方向及转移距离。

最后,根据已有二维耦合协调度模型^[28],提出一个单位面积“碳源—碳汇”耦合协调距离模型,了解内部碳(源)排放与碳(汇)吸收之间协调性,分析逐年碳收支的空间协调性与差异。该模型以单位面积碳源量为横坐标,单位面积碳汇量为纵坐标(图 2),当城市的碳排放量和碳吸收量耦合程度越高,则“碳源—碳汇”坐标点将越接近“1:1”对角线。

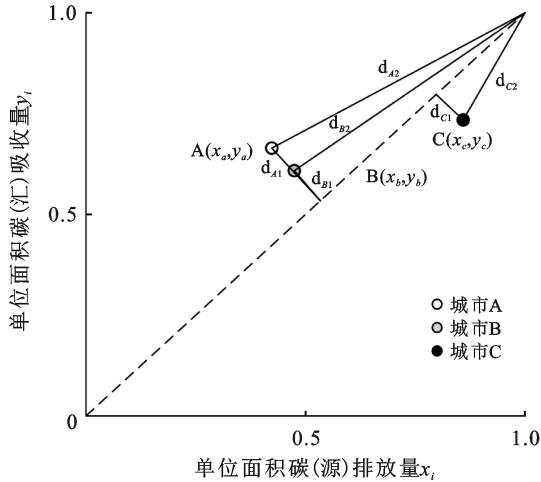


图 2 碳源—碳汇耦合协调度模型示意图

模型中设立 3 种不同的情况,如城市 A 与城市 B 比较而言, $d_{B1} < d_{A1}$, 因此城市 B 的碳源与碳汇耦合性更高。此外,本文还引入了坐标点与极限点的距离来进一步区分,当城市 B 与城市 C 对角线距离相同

时 $d_{C2} < d_{B2}$, 故城市 C 的碳排与碳汇耦合性更高。因而可以将“单位面积碳源量—单位面积碳汇量”坐标点与对角线和极限点的距离之和定义为耦合协调距离 d , 计算公式为:

$$d_i = \frac{|x_i - y_i|}{\sqrt{2}} + \sqrt{(x_i - 1)^2 + (y_i - 1)^2} \quad (3)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为碳源—碳汇坐标点的横纵坐标,即归一化的单位面积碳排放值与单位面积碳吸收值; d_i 为城市 i 的耦合协调距离; d_i 越小,则该城市 i 的碳排放与碳吸收的耦合协调度越高。

1.3.2 城市群碳补偿指标评价体系与分区模型构建

(1) 综合指标体系评价构建。基于国土空间规划中自然要素评价存在的指标与方法等^[29]问题,同时,借鉴生态承载力和资源环境承载力评价体系^[30-31],碳中和潜力指标^[32],低碳城市评价指标^[17,33],城市群综合承载力^[26],并基于碳源/碳汇的过程结合相关模型来设定评价指标。综合考虑社会经济发展力度、自然资源消耗情况和生态环境保护层级因素,建立一个更为清晰目标明确的碳补偿功能分区评价体系,确定目标层集为 $U = \{T_1, T_2, T_3\}$ 分别对应社会经济子系统、资源利用子系统和生态环境子系统,准则层集为 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{10}\}$, 分别对应 10 个评价指标。该体系选取的评价指标来源于 2020 年各省市统计年鉴数据以及用 ArcGIS 10.6 处理过后的土地数据(表 2)。

表 2 碳补偿分区综合评价体系

目标层	准则层	指向	指标	指标说明
碳补偿分区综合评价指数(U)	社会经济子系统(T ₁)	+	人均 GDP(X ₁)	各城市人均生产总值/万元
		-	人口密度(X ₂)	单位土地面积上的人口数量/(人·km ⁻²)
		+	经济密度(X ₃)	各城市国内生产总值与区域面积之比/(万元·km ⁻²)
		-	城镇化率(X ₄)	城镇人口占总人口(包括农业与非农业)的比例/%
	资源利用子系统(T ₂)	+	人均耕地面积(X ₅)	耕地面积除以范围内的常住人口数量(m ² /人)
		-	人均建设用地面积(X ₆)	建设面积除以范围内的常住人口数量(m ² /人)
	生态环境子系统(T ₃)	+	人均林地面积(X ₇)	林地面积除以该范围内的常住人口数量(m ² /人)
		+	人均草地面积(X ₈)	草地面积除以范围内的常住人口数量(m ² /人)
		-	人均碳排放量(X ₉)	各城市内平均每人的二氧化碳排放量单位(kg/人)
		+	水域湿地面积比例(X ₁₀)	各城市内水域湿地占区域总面积的比值单位/%

(2) 熵权-TOPSIS 评价模型。

①基于熵权法确定权重。对指标进行归一化处理,采用非零变换的指标标准化以消除各指标的量纲不统一带来的误差影响。指标的归一化公式为:

$$\text{正向: } x'_{ij} = 0.99 \times \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.01 \quad (4)$$

$$\text{负向: } x'_{ij} = 0.99 \times \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.01 \quad (5)$$

式中: $\min(x_{ij})$ 和 $\max(x_{ij})$ 分别为指标数据的最小值与最大值。 x'_{ij} 表示第 i 个指标第 j 个城市的标准值。为保证指标权重的客观性,权重的具体值采用熵权法^[34]进行计算,其详细的指标权重计算公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (e_j \in [0, 1]) \quad (6)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

式中: P_{ij} 表示待求的第 j 个影响因子向量中的第 i 个值所占该影响因子的概率^[28]。其中 $(P_{ij} = x_{ij} / \sum x_{ij})$ e_j 为第 j 项指标的熵值, \ln 为自然对数; d_j 为第 j 项指标的差系数其中 $(d_j = 1 - e_j)$, 其中 W_j 为各指标的权重; m 为指标总数。

②TOPSIS 模型构建。运用 TOPSIS 法^[35] 计算目标与正、负理想解的偏离和靠近度来研究区域碳补偿度及变化趋势, 为增强矩阵客观性, 结合熵权值 W_j 创建加权规范化评价矩阵 Y , 相关计算过程见公式。

a 基于熵权的评价矩阵构建。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{11} \cdot w_1 & x'_{12} \cdot w_1 & \cdots & x'_{1n} \cdot w_1 \\ x'_{21} \cdot w_1 & x'_{22} \cdot w_1 & \cdots & x'_{2n} \cdot w_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} \cdot w_1 & x'_{m2} \cdot w_1 & \cdots & x'_{mn} \cdot w_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: y_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个城市加权后的规范值; $i = 1, 2, \dots, m$, m 为评价指标数; $j = 1, 2, \dots, n$, n 为评价城市个数。

b 正负理想解确定。令 Y^+ 为最偏好的方案(正理想解), Y^- 为最不偏好方案(负理想解), 计算公式为:

$$Y^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m \} = \{ y_1^+, y_2^+, \dots, y_m^+ \} \quad (9)$$

$$Y^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m \} = \{ y_1^-, y_2^-, \dots, y_m^- \} \quad (10)$$

c 距离计算。选用欧式距离法, 分别计算每个城市向量到正理想解的距离 D_j^+ 和负理想解的距离 D_j^- , 计算公式为:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^+ - y_{ij})^2} \quad (11)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^- - y_{ij})^2} \quad (12)$$

式中: D_j^+ 为第 i 个指标与 y_j^+ 的距离; D_j^- 为第 i 个与 y_j^- 的距离; y_{ij} 为第 i 个指标第 j 年加权后的规划范围。

d 与理想解的贴近度计算。城市群碳补偿水平通过与理想解的贴近度来反映式中 T_j 表示第 j 个城市碳补偿水平与最优碳补偿的靠近程度, 可定义为碳补偿贴近度(即评价指数), 其取值为 $[0, 1]$, T_j 越大越接近最优碳补偿度, 迄今为止没有对碳补偿评价体系统一标准, 因而本研究基于中位数原则, 设定安全阈值为 0.5^[36], 根据每个城市的不同评价指标贴近度大小来对评价对象进行排序从而为后续的碳补偿分区具有计算简便、结果合理的优势, 计算公式为

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (13)$$

(3) 三维魔方法与碳补偿分区模型。研究将三维魔方法^[37]用于碳补偿分区的判断中, 根据碳补偿综合评价体系下三大子系统表征的社会经济、资源利用、生态环境设为三方主体, 构建三维坐标空间对各类空间要素进行分级, 根据测得的 3 个子系统碳补偿贴近度对 3 个坐标方向上指标高低进行分级, 从而根据维度组合判断最终属性及分类, 形成 $4 \times 4 \times 4$ 的三维魔方图, 共计 64 个魔方单元, 每一单元 (x, y, z) 代表 1 个特征类型组合进而划分出碳补偿的功能分区, 如图 3 所示。

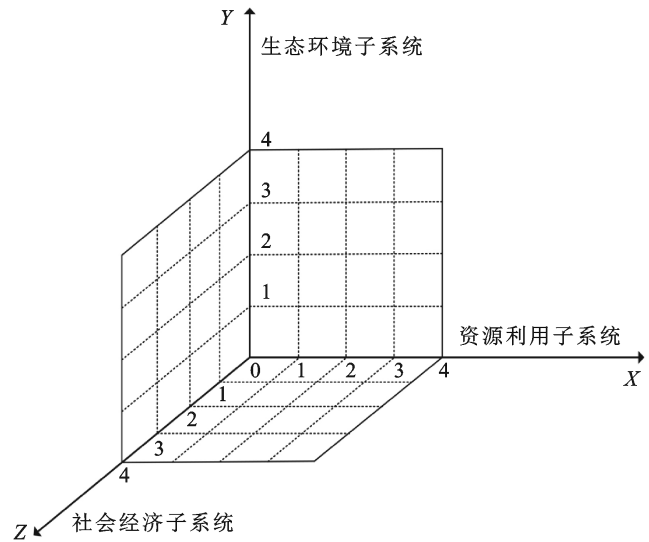


图 3 碳补偿综合评价体系下的三维魔方图

为更直观地对区域碳补偿进行评价与分区构建, 依据现有研究, 结合北部湾各城市区域实际情况, 按照指标等级范围将最优解的相对贴近度划分为 4 级, 按照节点距离三维空间原点的远近确定各节点的属性值为 1, 2, 3, 4, 要素指数值越大, 距离原点越远, 级别越高, 越能代表该要素所对应的碳补偿发展水平等级类型(表 3)。

表 3 碳补偿综合评价水平等级

等级水平	较差水平 (1 级)	一般水平 (2 级)	良好水平 (3 级)	优秀水平 (4 级)
贴近度	0.00~0.30	0.31~0.60	0.61~0.80	0.81~1.00

借鉴生态补偿的研究范式, 将碳补偿定义为碳排放主体对碳汇主体进行补偿的行为^[5], 其实质是外部性内部化的过程。碳补偿分区的核心思想是实现碳排放主体与碳汇主体之间的利益协调, 目的在于实现区域之间的碳公平和协同减排^[7]。在科学方案划分上, 按照碳补偿分区理论框架, 将研究区划分为碳强度控

制区、低碳优化区和碳收支平衡区 3 种类型区^[6]。

2 结果与分析

2.1 北部湾城市群碳收支空间特征分析

2.1.1 碳收支时空分布特征 基于 ArcGIS 10.6 软件对 2000, 2010, 2020 年碳排放和碳吸收的空间分布可视化。从整体上看, 2000 年以来, 北部湾城市群整体碳排放量从 3.03×10^7 t 稳步升至 3.86×10^7 t 之后

波动下降至 2020 年的 2.72×10^7 t, 表明北部湾协同发展对缓解湾区城市群碳排放作用明显, 而整体的碳吸收量是从 2000 年的 3.60×10^7 t 到 2010 年的 3.79×10^7 t 以及 2020 年的 3.52×10^7 t, 表明湾区城市群生态基底良好, 拥有大量的碳汇空间, 生态环境较为优越, 但 2010—2020 年有明显的衰减趋势(图 4), 说明 2010 以后经济发展迅速城市扩张速度加快, 导致大部分碳汇空间用地被侵蚀^[38]。

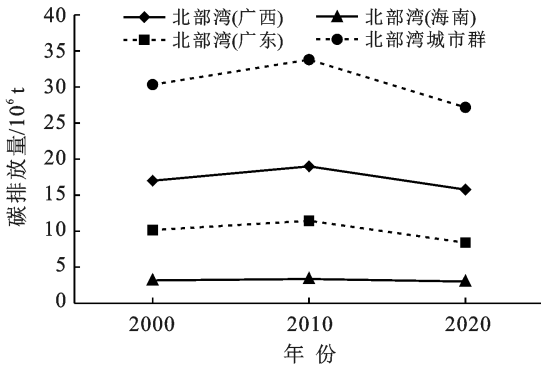
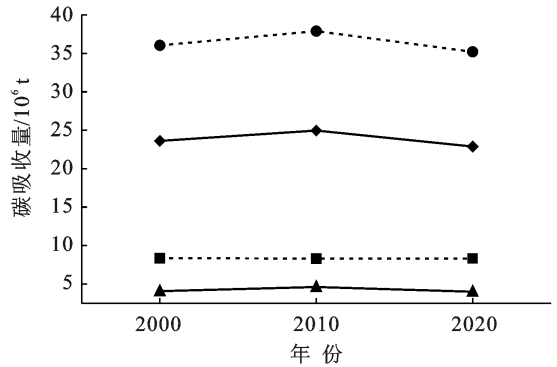


图 4 2000—2020 年北部湾城市群碳排放量与碳吸收量变化



市级尺度碳排放整体上呈现以南宁、湛江为高值中心, 向外逐步降低的“核心—外围”结构, 海南各县市基本处于碳排低值区域。2000 年碳排放高值区域包括南宁市、湛江市, 中高值区域包括茂名市、崇左市, 这两类区域承载了北部湾城市群 59.29% 的碳排放, 其余 11 个市县为碳排放低、中低和中值区域, 主要分布

在广西区域南部、海南区域和广东区域东部, 承载了 40.71% 的碳排放; 2010 年碳排放高值区和中高值区明显增多, 低值区域城市基本不变; 2020 年则出现了低值区域明显增加、高值区域减少的现象(图 5), 其中碳排放高值和中高值区域的城市承载了大量人口和经济发展, 占据整个城市群绝大多数的碳排放量。

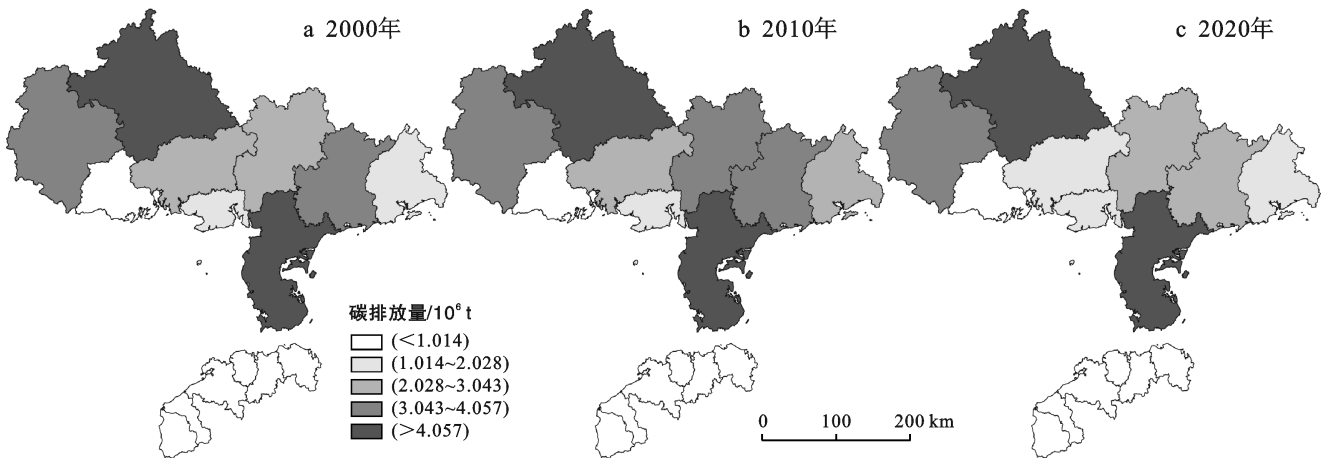


图 5 2000—2020 年北部湾城市群碳排放时空分布

反观城市群碳吸收情况, 主体吸收区域呈现“倒钩”状空间格局。2000, 2010, 2020 年碳吸收高值区域分布变化不大, 主要包括南宁、崇左、玉林、钦州 4 个城市, 此类城市是保障北部湾城市群生态安全的重要区域, 其生态环境优良、生态服务功能卓越, 承载了极大的固碳量, 而碳吸收低值区域主要分布在海南各县市(图 6)。

2.1.2 碳收支空间分异特征 本文采用标准差椭圆法和重心迁移进一步揭示北部湾城市群碳排放碳吸收重心的迁移变化以及高碳排/汇空间分布。2000—2020 年北部湾城市群碳源与碳汇在分异格局上基本保持稳定, 除广西区域呈现西北—东南方向, 其余地区碳排放与碳吸收均呈现东北—西南为主导的方向, 空间分布中心稳定(图 7—8)。其中 2000—

2010年广西区域碳源重心由南宁市向东南迁移12.95 km至钦州市,2010—2020年向西北迁移16.63 km回至南宁市,碳汇重心则基本稳定在南宁市;2000—2010年广东区域碳源重心于湛江市东北方向迁移2.45 km,2010—2020年重心由湛江市向西南方向迁移5.11 km至茂名市,碳汇重心则基本稳定在茂名市;

2000—2010年海南区域碳源重心基本稳定在临高县,2010—2020年由临高县向西南方向迁移11.35 km至儋州市,碳汇重心基本保持在儋州市(图9)。

2.1.3 碳收支耦合协调度检验 根据“碳源—碳汇”协调距离模型对北部湾城市群碳排放和碳吸收进行耦合协调度分析,分析结果如图10所示。

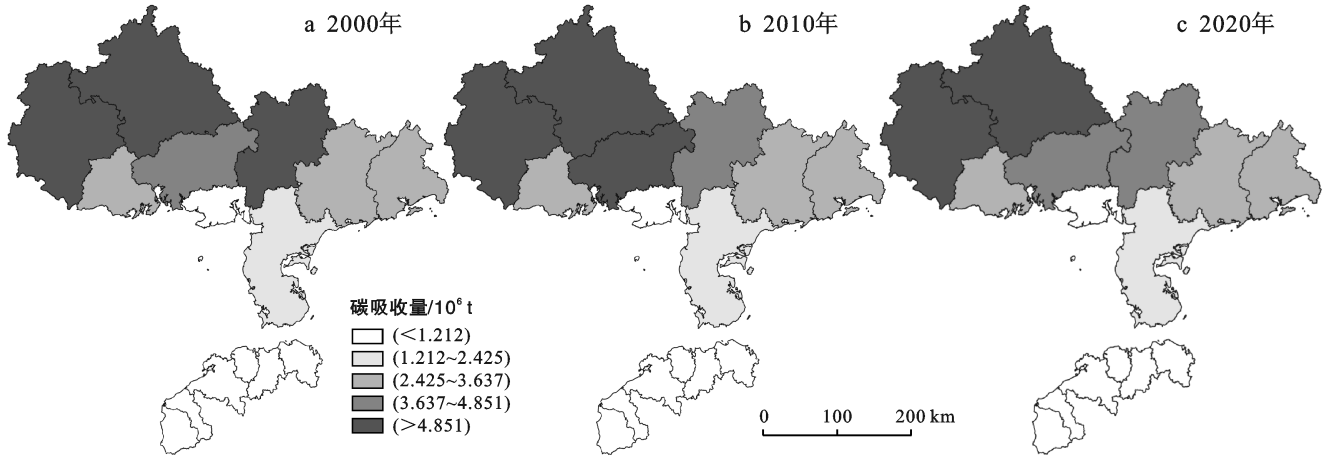


图6 2000—2020年北部湾城市群碳吸收时空分布

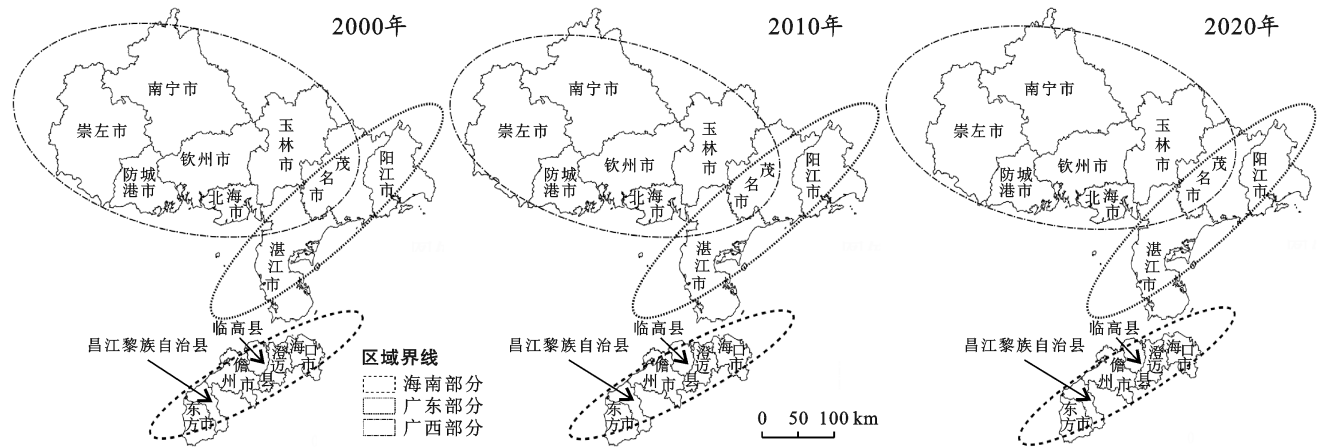


图7 2000—2020年北部湾城市群碳源分布标准差椭圆

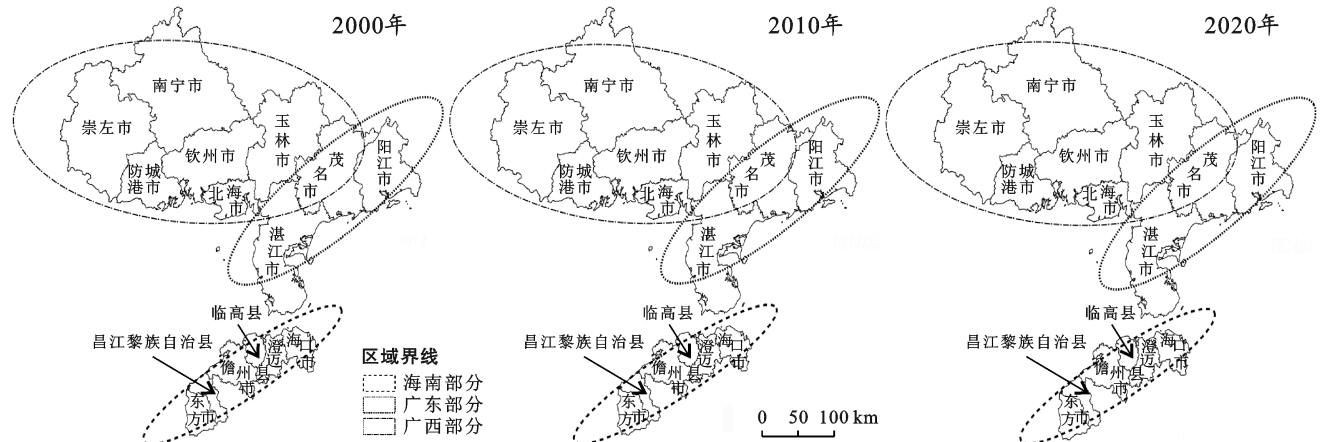


图8 2000—2020年北部湾城市群碳汇分布标准差椭圆

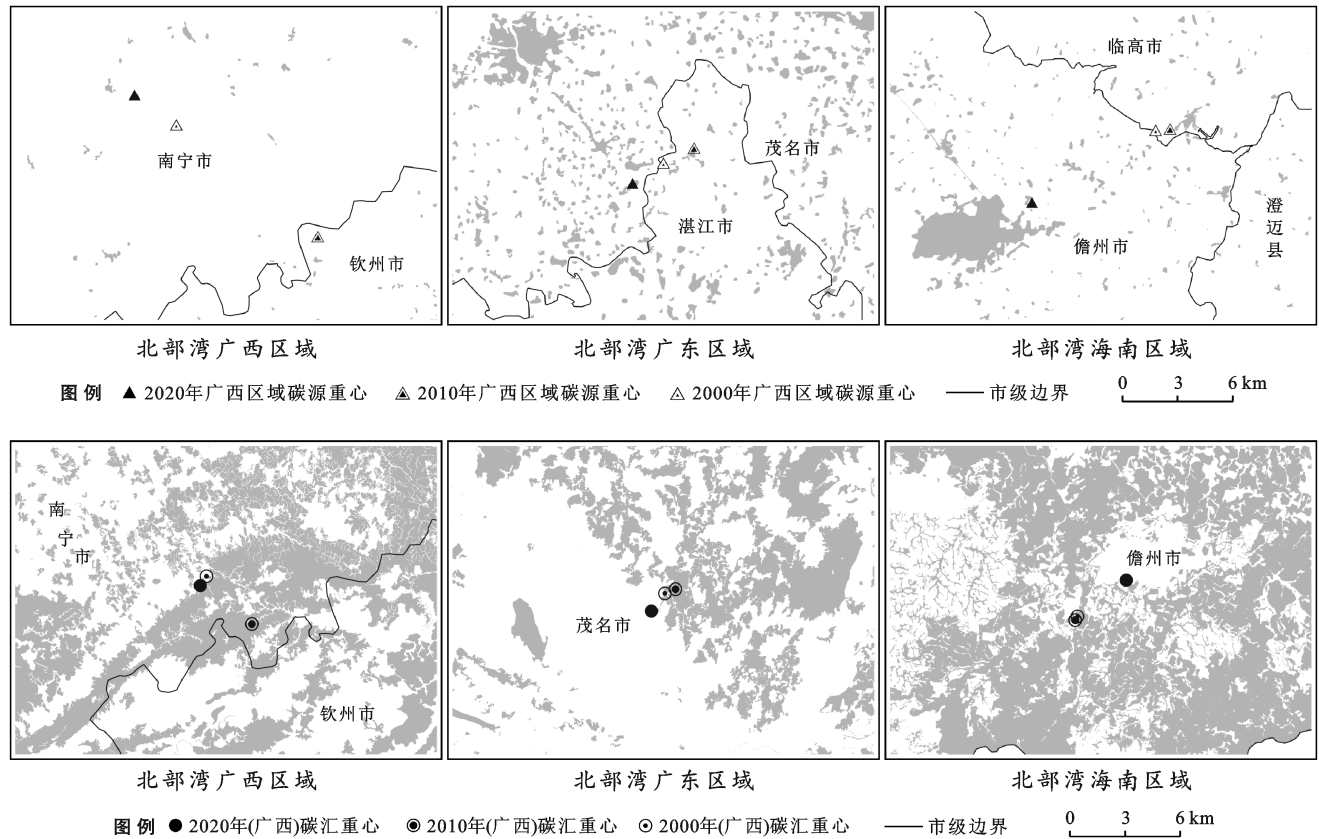


图 9 北部湾城市群 2000—2020 年碳源/碳汇重心迁移轨迹

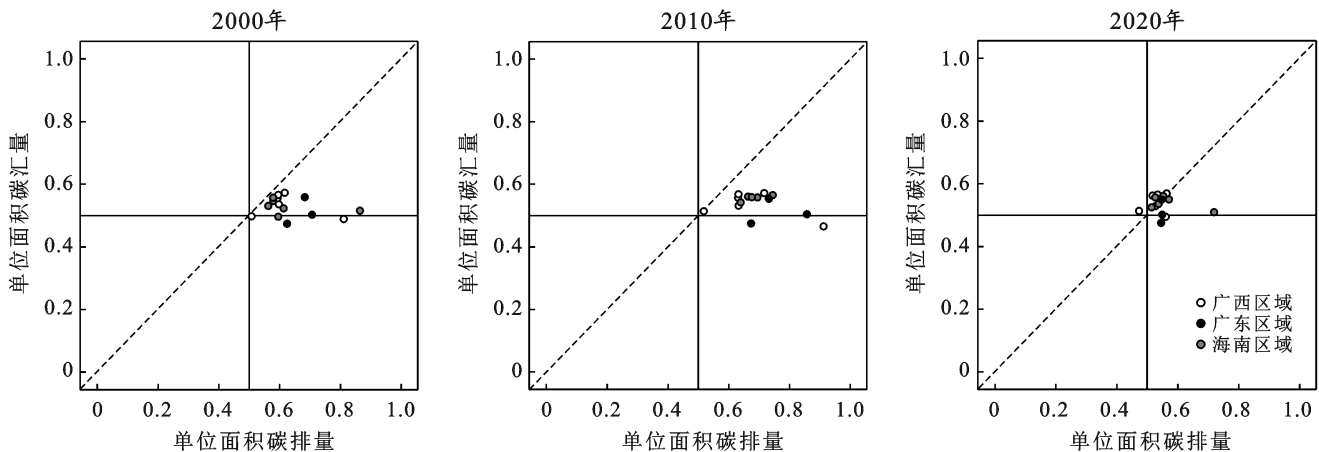


图 10 2000—2020 年北部湾城市群单位面积碳源与碳汇变化特征

根据归一化后碳排放与碳吸收的值域范围,将坐标系原点设置为(0.5,0.5),X轴为碳排放水平,Y轴为碳吸收水平。坐标轴划分的4个象限分别代表碳源和碳汇不同的耦合协调度,即第I象限代表城市碳排放与碳吸收水平均处于较高水平,属于良好耦合协调性;第II象限代表碳汇能力较好而碳排能力较差,表征出经济发展碳排弱于生态环境碳汇量,属于城市碳排放滞后于碳吸收类型;第III象限碳排放与碳吸收状况相近但水平较低,属于初级耦合协调类型;第IV

象限代表碳排水平较高而碳汇能力较低,表示生态环境碳汇弱于经济发展碳排放量,区域发展较粗犷。整体上2000—2020年坐标点大多集中在第I象限,此时城市群内部的城市碳源与碳汇坐标均高于0.5(图10),碳排放与碳吸收水平较高,两者具有较高的耦合协调性;其中玉林、澄迈和临高这些城市20a来碳源与碳汇耦合协调度距离最短,这些城市在不断推进经济发展的过程中,生态环境状况维持在较为良好的水平,是典型的良好耦合协调型城市。时间和空间分布

上,2000—2010 年城市群内部发生较大变化,坐标点开始偏离对角线且数量明显增多,甚至部分城市趋向第四象限的程度更大,其中北海、阳江和海口耦合协调距离明显加大(图 10)。

从 2000—2020 年散点图可以看出,北部湾城市群内部城市再次接近对角线,经过几年的良性发展,位于第Ⅳ象限的北海、海口、湛江这些城市随着碳汇指数的上升而逐渐趋向转入第Ⅰ象限,此时北部湾城市群经济发展与生态环境状况再次回归良好耦合协调阶段。整个研究期间内不同象限城市的数量变化反映了北部湾城市群在近 20 a 推进经济发展的过程中,城市生态环境曾一度滞后于经济发展,但是近年来随着生态文明建设理念不断深入人心以及政策的实施,使得出现好转的态势,城市经济发展与生态环境的耦合协调性不断增强。

2.2 碳补偿指标评判标准确定与分区构建

2.2.1 碳补偿评价指标测度

本研究基于计算得到的评价指标权重结果建立加权规范化矩阵,得出各指标的正、负理想解,经计算求得 2020 年湾区城市群 15 个地级市的社会经济、资源利用、生态环境子系统与理想值的贴近度,并用以衡量碳补偿分区评价标准,揭示了北部湾 15 个地级城市的评价测度和具体情况(图 11)。

从社会经济子系统来看,较为理想的城市为南宁、海口、澄迈、临高、儋州几个城市分别为 0.612 6, 0.730 8, 0.660 9, 0.676 2, 0.688 6,从数据内部指标来看这几个城市人均 GDP 较高但人口密度低于其他城市,经济密度和城镇化率较高,表征出上述城市社会经济发展具有较好的耦合性。人口密度、城镇化率越高会加深区域人地矛盾,碳排放量必然也会加剧,如不及时改善则易陷入人地系统不协调的混乱状态,在快速发展的城市中如防城港、北海和湛江等城市则呈现低贴近度值;从资源利用子系统来看崇左最高为 0.987 7,其次是南宁和儋州,从资源利用内部系统来看耕地和建设用地起到了绝大作用,而北海、阳江、海口、澄迈、临高和昌江均处于低值,说明这些城市对土地资源利用程度较小,没有进行土地资源的合理开发或者过度开发,北海近些年经济发展有快速提高的趋势,仍存在建设用地肆意掠夺生态用地现象,导致生态环境并不良好;从生态环境子系统来看,除澄迈以外的所有城市均未超过 0.5,说明在生态环境上除林地、草地的优越条件以外,城市工业发展产生的碳排放量起到了相对制衡的因素,因此生态环境效果并不显著,此现象表征出北部湾所有城市的碳汇功能用地分布均不理想。

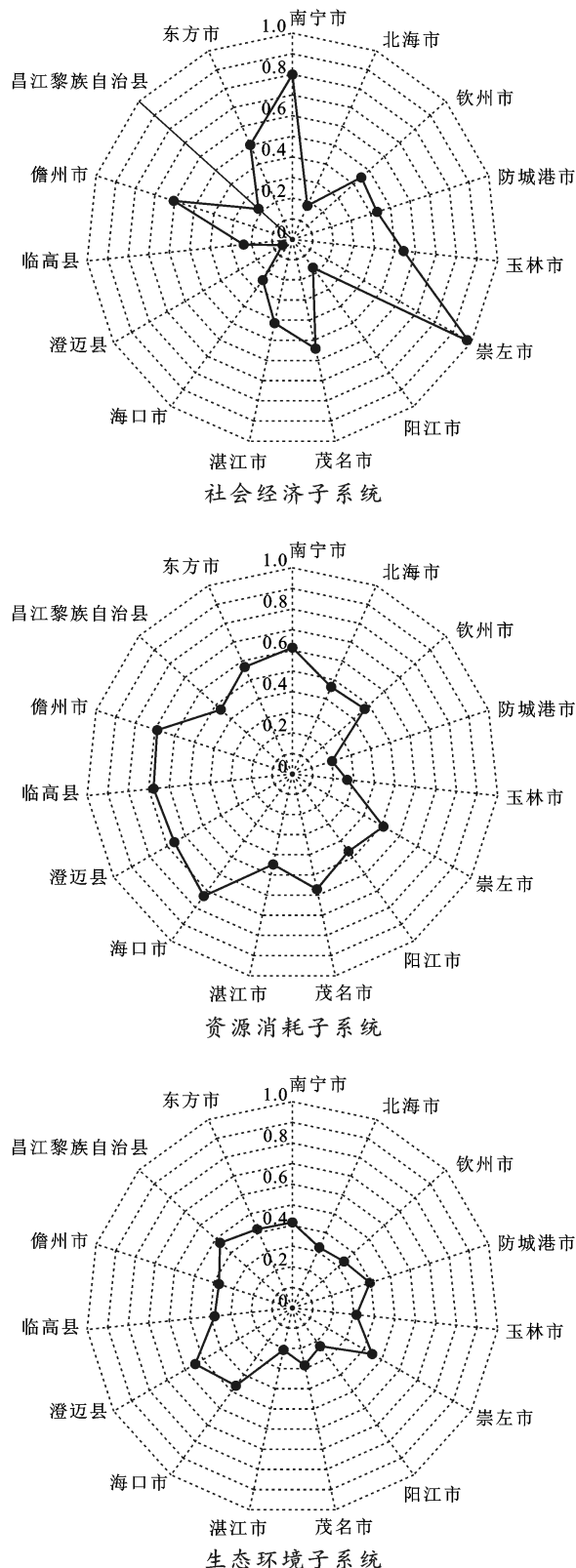


图 11 北部湾 15 个城市各项子系统测度结果

2.2.2 碳补偿分区单元构建

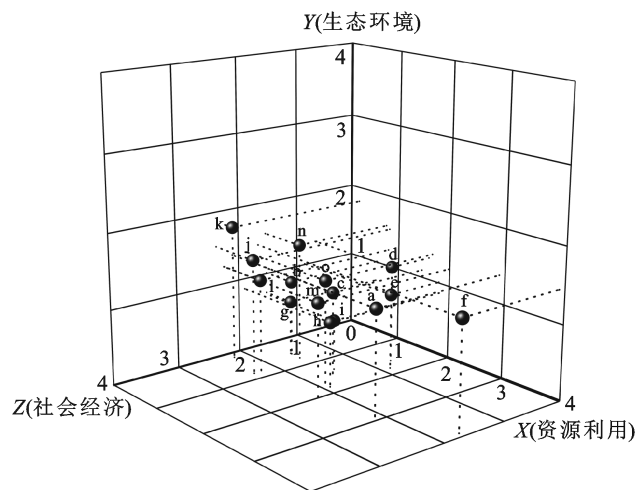
按照绝对优势,相对优势的顺序确定碳补偿分区准则(表 4),继而形成三维魔方城市单元分布(图 12)。当空间单元坐标(x, y, z)中任何一个要素等级都不超过 2 时,此为第一层次,表示该单元坐标内城市的社会经济发展水平、资

源利用程度和生态环境因素均处于绝对劣势,如北海市、钦州市、防城港市、玉林市、阳江市、茂名市、湛江市、昌江黎族自治县和东方市。这些城市表征出单元内部城市碳排放量与碳汇量均不乐观,区域经济发展与生态环境呈现低级耦合协调状态,即可视为碳强度控制区域,今后应注意采取措施是在城市经济发展过程中提高能源效率、确定碳排放强度及碳排放总量约束的目标,调整和约束高碳排产业发展,促进区域低碳转型;当空间单元坐标 (x, y, z) 中有且仅有某一个类别的主体功能区级别为 3,且其他类别要素等级均小于 3 时,此为第二层次划分,该单元内部城市三方子系统至少有一方在博弈状态中趋于较为优势等级,如南宁市、海口市、澄迈县、临高县和儋州市,表征出该些城市内部碳排放量与碳汇量较为可观,区域经济发展与生态环境呈现中或中高耦合协调状态,即可视为低碳优化区域。若该区域某些城市农业发展基础一般且发展经济水平较弱,可重点注意保护基本农田要以农业为基础带动相关产业发展,避免大规模城市

开发。若该区域内城市经济发展良好,但农业主体区域和建设用地开发区域产生矛盾,导致区域城乡发展不平衡,今后应尽可能限制城市化、工业化开发,着力保护生态环境;当空间单元坐标 (x, y, z) 中有且仅有某一个类别的要素等级为 4 时,此为第三层次划分,该单元内部城市三方子系统至少有一方在博弈状态中处于绝对优势等级。根据核验数据,崇左市在资源利用要素中呈现极大值,而其他要素均呈现一般值。这主要是崇左市耕地资源极为优越,建设用地并未过度开发,林地、草地和水域等碳汇用地均呈现优势等级,表征出崇左市碳排放量与碳汇量极为可观,区域经济发展与生态环境呈现高度耦合状态,此时崇左市视为碳收支平衡区。但该城市经济发展力度明显不足,今后在城市开发过程中应避免过度开发导致建设用地与农业用地的不平衡,崇左市农业生产条件较好,今后应以提高农产品供给为重点任务,增强农业综合生产能力,大力发展现代化农业,严格控制开发强度避免逐步减少农村居民点占用的国土空间。

表 4 北部湾城市群碳补偿分区单元构建

补偿区划类型	子系统要素类型	三维魔方单元	地区
第一层级 (碳强度控制区)	三方限制区域	$(x, y, z) x, y, z \in [1-2]$	北海市、钦州市、防城港市、玉林市、阳江市、茂名市、湛江市、昌江黎族自治县、东方市
第二层级 (低碳优化区)	社会经济发展区	$(3, y, z) 1 \leq y, z \leq 2$	南宁市、海口市、澄迈县、临高县、儋州市
	资源利用合理区	$(x, 3, z) 1 \leq x, z \leq 2$	
	生态环境保护区	$(x, y, 3) 1 \leq x, y \leq 2$	
第三层级 (碳收支平衡区)	社会经济发展区	$(4, y, z) 1 \leq y, z \leq 3$	崇左市
	资源利用合理区	$(x, 4, z) 1 \leq x, z \leq 3$	
	生态环境保护区	$(x, y, 4) 1 \leq x, y \leq 3$	



注:a 为南宁市; b 为北海市; c 为钦州市; d 为防城港市; e 为玉林市; f 为崇左市; g 为阳江市; h 为茂名市; i 为湛江市; j 为海口市; k 为澄迈县; l 为临高县; m 为儋州市; n 为昌江黎族自治县; o 为东方市。
图 12 北部湾城市群碳补偿分区三维空间魔方城市单元分布

3 讨论

本文是基于土地利用碳收支时空分异及耦合协调调度分析基础上,构建综合评价体系并引入三维魔方单元模型初步构建碳补偿等级进行功能分区研究,具有一定的前瞻性与可行性。但研究尚有不足之处,由于北部湾城市群过于庞大和复杂,部分市域层面上数据收集比较困难,对论文研究进展产生了一定的阻碍。在测算不同土地利用方式的碳排放碳吸收时,采用的碳效应系数来源于其他文献,虽选择了与北部湾三省域自然条件较为相符的研究成果,但由于多种条件受限,可能会影响最终结果的准确性,在以后的研究中可以根据研究区实际情况对这些系数进行深入分析,探究出更加适用于北部湾城市群碳排放系数。本研究以市域为尺度单元展开研究,考虑到县、镇域内部也存在一定的差异性,可进一步以县域为

基本研究单元,提高现实指导作用。最后作为一个探索性研究,本文仅划分碳补偿类型区,并未核算各区域碳补偿的价值标准,未来应多方面考虑区域资源能力、碳排放强度、经济发展条件以及碳价格等。这些都将在后续研究中加以探讨及改进,从而健全城市群区域间、城市内部碳补偿体制,进一步探索实现“双碳”目标的多元化路径,实现区域协同碳减排发展目标。

4 结论

通过对北部湾城市群各年土地利用碳收支变化情况定量分析,并根据相关研究方法构建碳补偿等级模型进行功能分区。

(1) 宏观尺度下 2000—2020 年北部湾城市群碳(源)排放量与碳(汇)吸收量均呈先增后减的态势;市级尺度碳排放呈现以南宁、湛江为高值中心,向外逐步降低的“核心—外围”结构,主体吸收区域呈现“倒钩”状空间格局;2000—2020 年北部湾城市群碳源与碳汇在分异格局上基本保持稳定,除却广西区域呈现西北—东南方向,其余地区碳排放与碳吸收均呈现东北—西南为主导的方向,空间分布中心稳定,碳源/碳汇重心迁移变化基本一致。

(2) 基于单位面积碳源和碳汇指数构建的耦合协调距离模型能够有效识别出城市群内部碳排放和碳吸收的耦合协调程度,并根据象限特征将城市划分为良好协调类型、初级协调类型、城市碳排放滞后型和城市碳吸收滞后型城市。

(3) 基于熵权法和 TOPSIS 法构建指标权重,测得北部湾 15 个城市社会经济、资源利用、生态环境子系统与理想值的贴适度,从而判定出各子系统中的最优解城市,继而根据贴适度指标的等级水平构建三维魔方单元,确定碳补偿分区准则,划定出碳强度控制区、低碳优化区和碳收支平衡区。

[参 考 文 献]

[1] 覃盟琳,欧阳慧婷,刘雨婷,等.“双碳”目标下我国湾区城市群空间规划应对策略[J].规划师,2022,38(1):17-23.

[2] 周侃,李会,申玉铭.京津冀地区县城环境胁迫时空格局及驱动因素[J].地理学报,2020,75(9):1934-1947.

[3] 周侃.中国环境污染的时空差异与集聚特征[J].地理科学,2016,36(7):989-997.

[4] 李小康,王晓鸣,华虹.土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J].生态经济,2018,34(1):14-19.

[5] 赵荣钦,刘英,马林,等.基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J].自然资源学报,2016,31(10):1675-1687.

[6] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.

[7] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.

[8] 邓祥征,蒋思坚,李星,等.区域土地利用影响地表 CO₂ 浓度异质性特征的动力学机制[J].地理学报,2022,77(4):936-946.

[9] 裴杰,王力,柴子为,等.基于 RS 和 GIS 的深圳市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J].水土保持研究,2017,24(3):227-233.

[10] 张赫,彭千芮,王睿,等.中国县域碳汇时空格局及影响因素[J].生态学报,2020,40(24):8988-8998.

[11] 张巍.区域碳补偿标准及额度研究[J].统计与决策,2019,35(24):55-58.

[12] 于洋,杨帆,杨光.中国省域碳源、碳汇量和减排补偿制度[J].资源开发与市场,2015,31(12):1442-1445.

[13] 吴昊玥,何艳秋,陈文宽,等.中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究:基于空间 Durbin 模型[J].农业技术经济,2020(3):110-123.

[14] 丁晨希,王立国.自愿机制下森林旅游地经营者碳补偿意愿的影响因素研究:基于江西省 10 个森林公园 464 份样本的调查分析[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(1):104-113.

[15] 徐婕,潘洪义,黄佩.基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(1):142-152.

[16] 葛颖.云南省农田生态系统净碳汇及其补偿机制研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2017.

[17] 尚丽,苏昕,汪鸣泉,等.城市低碳评价指标体系研究进展[J].城乡规划,2018(1):78-83.

[18] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].生态学报,2016,36(22):7244-7259.

[19] Tsuruta H, Mosier A. Estimate of CH₄ emissions from year-round flooded rice fields during rice growing season in China [J]. Pedosphere, 2005,15(1):66-71.

[20] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏南京:南京大学,2010.

[21] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.

[22] 肖红艳,袁兴中,李波,等.土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(1):38-42.

[23] 张中秋,胡宝清.区域土地利用结构与能耗碳排放关联测度方法与应用:以南宁市为例[J].广东农业科学,2012,39(9):207-211.

[24] 游和远,吴次芳,沈萍.土地利用结构与能源消耗碳排放

- 的关联测度及其特征解释[J].中国土地科学,2010,24(11):4-9.
- [25] 赵荣钦,黄贤金.基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J].地理研究,2010,29(9):1639-1649.
- [26] 赵景峰,李妍.黄河流域城市群综合承载力评价及时空分异演进[J].生态经济,2022,38(2):75-83.
- [27] 郑伯铭,明庆忠,刘安乐,等.西部省区旅游经济效率与区域经济水平的重心耦合及互动响应研究[J].世界地理研究,2022,31(2):350-362.
- [28] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.
- [29] 李平星,周健,刘申伟.国土空间规划的自然要素评价与集成:进展与展望[J].生态环境学报,2021,30(12):2431-2440.
- [30] 孙阳,王佳韡,伍世代.近 35 年中国资源环境承载力评价:脉络、热点及展望[J].自然资源学报,2022,37(1):34-58.
- [31] 高喜红,许文豪,林宇晨,等.区域生态承载力评价方法及指标研究[J].西部人居环境学刊,2021,36(1):57-65.
- [32] 王垚,朱美琳,王勇,等.长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究[J].规划师,2022,38(3):61-67.
- [33] 吴健生,许娜,张曦文.中国低碳城市评价与空间格局分析[J].地理科学进展,2016,35(2):204-213.
- [34] 俞艳波,杨立涛,赵兴哲,等.一种基于熵权法理论的水准网平差定权方法[J].测绘地理信息,2022,47(2):30-33.
- [35] 黄志启,郭慧慧.基于熵权 TOPSIS 模型的郑州市资源环境承载力综合评价[J].生态经济,2019,35(2):118-122.
- [36] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,等.基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2018,33(9):1627-1641.
- [37] 叶菁,谢巧巧,谭宁焱.基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J].农业工程学报,2017,33(11):262-271.
- [38] 宋苑震,覃盟琳,袁倩文,等.碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(5):1071-1082.

(上接第 328 页)

- [20] 刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.
- [21] Wang Lunche, Zhu Hongji, Lin Aiwen, et al. Evaluation of the latest MODIS GPP products across multiple biomes using global eddy covariance flux data [J]. Remote Sensing, 2017,9(5):418.
- [22] 林少君,贺立静,黄沛生,等.浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J].生态科学,2005,24(1):9-11.
- [23] 徐兆礼,沈新强.长江口水域浮游动物生物量及其年间变化[J].长江流域资源与环境,2005,14(3):282-286.
- [24] 王伟,顾继光,韩博平.华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J].应用与环境生物学报,2009,15(1):64-71.
- [25] 孙凌,金相灿,杨威,等.硅酸盐影响浮游藻类群落结构的围隔试验研究[J].环境科学,2007,28(10):2174-2179.
- [26] Desortová B. Relationship between chlorophyll- α concentration and phytoplankton biomass in several reservoirs in Czechoslovakia [J]. Internationale Revue Der Gesamten Hydrobiologie Und Hydrographie, 1981,66(2):153-169.
- [27] Watson K J. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: A tropical and temperate zone comparison [J]. Hydrobiologia, 1986,138(1):161-176.

(上接第 347 页)

- [67] Yue Junwei, Guan Jinhong, Deng Lei, et al. Allocation pattern and accumulation potential of carbon stock in natural spruce forests in northwest China [J]. PeerJ, 2018,6:e4859.
- [68] Nakano K, Shibahara N, Nakai T, et al. Greenhouse gas emissions from round wood production in Japan [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170:1654-1664.
- [69] Li Nian, Wei Caidi, Zhang Hui, et al. Drivers of the national and regional crop production-derived greenhouse gas emissions in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120503.