

# 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

李璐<sup>1</sup>, 董捷<sup>1</sup>, 徐磊<sup>2</sup>, 张俊峰<sup>3</sup>

(1. 华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070; 2. 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001; 3. 中南财经政法大学公共管理学院, 武汉 430073)

**摘要:** 开展功能区土地利用碳收支评估并构建碳补偿分区优化框架, 对于制定适应各功能区低碳策略、指导补偿额度流向、推动区域协调发展具有重要现实意义。以武汉城市圈县域为基本单元, 在分析主体功能区划下土地利用碳收支空间分异特征的基础上, 借助标准显示性比较优势指数法、SOM-K-means模型、二维关联矩阵等方法, 对武汉城市圈进行了碳补偿类型区划分及优化。结果表明: 武汉城市圈各县域土地利用碳排放总量地区差异显著, 呈现“西高东低, 中心最高”空间分布格局; 主体功能区划下土地利用碳排放、碳吸收均具有明显空间分异特征, 碳吸收与碳排放呈现出一定程度的相对空间分布趋势; 武汉城市圈共有16个碳补偿支付区、11个碳补偿获补区以及12个碳补偿平衡区; 结合主体功能区规划战略目标, 最终形成7类碳补偿空间优化区, 并对每一类型区提出了相应的低碳发展方向及策略。

**关键词:** 主体功能区划; 土地利用碳收支; 碳补偿分区; 空间优化; 武汉城市圈

随着经济快速发展, 能源消费与碳排放的持续增长加剧了生态环境问题, 人类发展与自然保护的矛盾也日渐凸显。IPCC第五次评估报告指出, 1880-2012年全球平均气温上升了0.65~1.06℃, 人类活动对全球变暖影响的可能性“极高”(95%以上), 其中主要因素是人类排放的温室气体。因此, 如何减少温室气体(特别是CO<sub>2</sub>)排放, 逐渐成为人类面临的重大挑战之一。国内外有大量研究表明土地利用/覆被变化是引起碳排放、碳吸收量变化的主要动因<sup>[1-4]</sup>。土地作为人类基本生产要素, 在城市化、工业化进程中, 区域土地利用结构不仅反映经济结构和产业布局, 更直接关系到碳源、碳汇变化。2011年国务院颁布实施了《全国主体功能区规划》, 以期促进资源节约、环境保护、减缓气候变化, 实现区域可持续发展。然而, 功能区规划发展一方面可能导致不同特点土地难以发挥其比较优势, 另一方面造成区域间社会经济发展与生态环境保护的不平衡<sup>[5-6]</sup>。由于限制区和非限制区土地开发强度不同, 进一步加剧了区域间土地利用碳收支的迥异局面。在应对气候变化和节能减排要求下, 探讨主体功能区规划对土地利用碳收支的影响, 对于明确区域内部差异改善生态环境、构建低碳发展模式起着极大的推动作用。

党的十九大报告指出: 要推进绿色发展、着力解决突出环境问题、加大生态系统保护力度、改革生态环境监管体制, 建立市场化、多元化生态补偿机制。因此, 在各区域

收稿日期: 2018-10-30; 修订日期: 2019-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(71774064, 71603288)

作者简介: 李璐(1993-), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为区域经济与低碳土地利用。

E-mail: 124670861@qq.com

通讯作者: 董捷(1960-), 女, 湖北武穴人, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地资源经济。

E-mail: dongjie@mail.hzau.edu.cn

具有不同开发和保护目标情况下,既要保证低碳运行,又要实现区域公平、可持续发展,是一个亟待解决的重要问题。碳补偿作为低碳、绿色发展背景下产生的生态补偿研究新领域,一种有效缓解经济发展与环境保护间矛盾的激励措施<sup>[7]</sup>,其中,碳补偿分区是实施区域碳补偿制度的前提和基础,合理界定区域补偿关系,可为横向碳补偿额度及其流向提供方向性指导,以实现提高生态环境保护积极性、合理投入及低碳高效产出的目标。现阶段关于补偿分区的研究大多集中于生态补偿分区<sup>[8]</sup>、耕地补偿分区<sup>[9]</sup>等,极大丰富了补偿分区的理论和方法。总体而言,一是关于区域碳补偿及补偿分区处于探索研究阶段,主要围绕森林<sup>[10]</sup>、农田<sup>[11]</sup>、旅游地<sup>[12]</sup>等领域;二是已有研究侧重以碳收支核算为依据进行补偿分区,未能进一步考虑区域碳的经济贡献率、碳汇生态作用等<sup>[13]</sup>。引入比较优势理论,依据区域土地利用碳收支自然、经济、生态等属性的比较优势,进行区域碳补偿分区,有助于从整体上把握各县域单元情况,创新补偿分区方式,更为科学合理地界定区域间碳补偿关系。

本研究以促进区域低碳、协调发展为目标,将武汉城市圈各县域作为研究对象,剖析主体功能区划下土地利用碳收支空间分异特征;以此为基础,借助标准显性比较优势指数法,判别区域土地利用碳收支各属性的比较优势,进而利用SOM-K-means模型划分碳补偿区域;并依据主体功能区规划战略目标,提出差别化碳补偿空间优化方案,以期对武汉城市圈低碳发展策略的制定提供决策参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

武汉城市圈是指以武汉市为圆心,包括黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市、咸宁市、仙桃市、潜江市、天门市共9个城市所组成的城市圈,下辖48个县(市、区)级行政单元,土地面积为5.78万km<sup>2</sup>。考虑到数据的可获取性,将部分市辖区合并为一个县(市、区)级行政单元,其中,武汉城区包括江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区、洪山区7个区,黄石城区则由黄石港区、西塞山区、铁山区、下陆区组成。武汉城市圈仅占湖北省总面积的31.09%,却集中了全省一半的人口、六成以上的生产总值,是湖北省及全国的重要战略支点。

《湖北省主体功能区规划》(简称《规划》)是根据《国务院关于编制全国主体功能区规划的意见》《全国主体功能区规划》《湖北省国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,并结合湖北省现状所编制。《规划》将武汉城市圈分为重点开发区、限制开发区和禁止开发区三大类型,由于禁止开发区是以点状分布于重点开发区、限制开发区中的一种功能类型区,较其他几类功能区而言,面积相对较小,因此未考虑此类型功能区。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 土地利用碳收支核算

根据土地利用现状分类,结合已有相关研究,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<sup>[14]</sup>。其中,经济社会活动引起的碳排放过程主要考虑能源消耗和人类及牲畜呼吸,自然生态系统主要将耕地、林地、草地、水域湿地、未利用地作为碳汇吸收。土地利用碳排放总量则来自碳源排放与碳汇吸收的差值。

### (1) 碳源排放

能源消耗碳排放计算公式如下:

$$C_e = E \times \sigma \quad (1)$$

式中:  $C_e$  表示某地区能源消耗的  $\text{CO}_2$  排放;  $E$  表示某地区能耗量 (吨标准煤);  $\sigma$  表示单位能耗  $\text{CO}_2$  排放系数, 取  $1.87 \text{ t C/t}$ , 依据不同类型能源碳排放系数及标准煤折算系数, 并考虑到研究区能源使用比例特征, 该取值较为合理。

人类及牲畜呼吸碳排放计算公式如下:

$$C_p = \sum (P_i \times \theta_i) \quad (2)$$

式中:  $C_p$  表示某地区人畜呼吸的  $\text{CO}_2$  排放;  $P_i$  表示某地区人畜数量;  $\theta_i$  表示每人 (只) 每年  $\text{CO}_2$  排放量, 每名成年人、每头猪每年呼出  $\text{CO}_2$  量分别为  $0.079 \text{ t}$ 、 $0.082 \text{ t}^{[14]}$ 。

### (2) 碳汇吸收

各类碳汇用地碳吸收计算公式如下:

$$C_l = \sum (L_i \times \delta_i) \quad (3)$$

式中:  $C_l$  表示  $\text{CO}_2$  吸收;  $L_i$  表示各类用地面积;  $\delta_i$  表示各类用地单位面积固碳速率。据已有研究, 耕地<sup>[3]</sup>、林地<sup>[15]</sup>、草地<sup>[16]</sup>、水域湿地<sup>[17]</sup>、未利用地<sup>[1]</sup>的碳排放系数分别取值为  $-0.13 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、 $-5.77 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、 $-0.022 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、 $-0.298 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 、 $-0.005 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

土地利用碳排放总量 ( $C$ ) 计算公式如下:

$$C = C_e + C_p + C_l \quad (4)$$

## 1.2.2 基尼系数

基尼系数 (Gini coefficient) 可用来度量某指标的区域差异及均衡程度<sup>[18]</sup>。其数学表达式如下:

$$Gini = \frac{\sum_i \sum_j |x_i - x_j|}{2n^2 \bar{x}} \quad (5)$$

式中:  $x_i$ 、 $x_j$  分别表示  $i$  地区和  $j$  地区的某一指标;  $\bar{x}$  表示武汉城市圈全部县域某一指标的平均值;  $n$  表示县域单元样本总数, 即  $n=39$ 。基尼系数取值区间为  $[0, 1]$ , 数值越大, 表明区域差异程度越大。 $[0, 0.2)$  表示高度平均或绝对平均;  $[0.2, 0.3)$  表示相对平均;  $[0.3, 0.4)$  表示比较合理;  $[0.4, 0.5)$  表示差异偏大;  $[0.5, 1]$  表示高度不平均。

## 1.2.3 标准显性比较优势指数

标准显性比较优势指数 (Normalized Revealed Comparative Advantage Index, NRCA Index) 是 Yu 等<sup>[19]</sup>在总结前人对 Balassa<sup>[20]</sup>显示性比较优势指数 (RCA) 修改基础上衍生提出的, 用于衡量一国产品市场竞争力的指标。现已广泛应用于能源利用、空间优势功能识别等方面, 本文将运用于土地利用碳收支各类优势属性识别上, 其数学表达式如下:

$$NRCA_j^i = X_j^i / X - X_j X^i / XX \quad (6)$$

式中:  $X_j^i$  表示  $i$  地区  $j$  属性的指标值;  $X_j$  表示所有地区  $j$  属性的总指标值;  $X^i$  表示  $i$  地区所有属性的总指标值;  $XX$  表示所有地区及属性的总指标值。

## 1.2.4 SOM-K-means 模型

自组织特征映射神经网络 (Self-Organization Mapping Net, SOM) 是由芬兰赫尔辛基大学 Kohonen<sup>[21]</sup>提出的一种无监督竞争式学习法神经网络。K-means 是基于原型目标函数聚类方法的典型代表, 采用误差平方和准则函数作为聚类准则函数。SOM-K-means 算

法结合了SOM的无监督竞争式自组织特点,以及K-means的高效率并且可伸缩性优点。本文运用SOM-K-means算法的聚类分析,进行县域碳补偿区域类型划分。

### 1.3 数据来源

本文以武汉城市圈39个县(市、区)级行政单元为研究对象,测度2015年各县(市、区)土地利用碳收支,数据主要来源于《湖北省统计年鉴》《中国县域统计年鉴》、各地级市统计年鉴及社会发展统计公报作为补充(数据调整均以2010年为基期)。研究区土地利用类型数据使用2015年的Landsat-8遥感数据为主要信息源,所有影像数据均已经过前期的辐射纠正、几何粗纠正、几何精校正和配准,并建立相应的遥感解译标志,将影像解译为建设用地、耕地、林地、草地、水域(湖泊、湿地)、未利用地7类土地利用类型,进一步结合野外验证点进行实地抽样调查,经统计2015年影像总体解译精度达到了88.95%。

## 2 结果分析

### 2.1 主体功能区划下土地利用碳收支空间特征分析

#### 2.1.1 城市圈土地利用碳排放总量特征分析

根据土地利用碳收支核算公式,计算得到2015年武汉城市圈各县域土地利用碳排放总量值,并借助ArcGIS平台绘制出空间分布图(图1)。结果表明,武汉城市圈土地利用碳排放总量位2.082亿t,其中碳源排放量为2.187亿t,碳汇吸收量为 $1.051 \times 10^7$ t,对比土地利用碳收支核算发现,武汉城市圈全区域的碳补偿率仅为4.803%,说明武汉城市圈土地利用碳源排放远高于碳汇吸收。从空间分布来看,武汉城市圈土地利用碳排放总量呈现“西高东低,中心最高”的空间分布特点。其中,城市圈的中、西部土地利用碳排放总量较高,该地区具有资源、政策、区位等方面的经济发展优势;而东部及外围地区土地利用碳排放量相对较低,该区域森林资源丰富、农业生产功能较强。依据基尼系数计算公式得到,武汉城市圈土地利用碳排放总量Gini系数为0.645,处于高度不平均状态,反映出武汉城市圈各县域土地利用碳排放总量存在高度的地区差异。

#### 2.1.2 主体功能区划下土地利用碳收支空间分异

##### (1) 主体功能区划下土地利用碳排放特征分析

根据土地利用碳源核算公式,计算得到2015年武汉城市圈各县域土地利用碳排放量,并借助ArcGIS平台绘制出空间分布图(图2)。从整体而言(图3),三种类型功能区的土地利用碳排放占比顺序是:重点开发区(80.65%)>农产品主产区(11.80%)>重点生态功能区(7.55%)。重点开发区土地利用碳排放占比最高,该类型

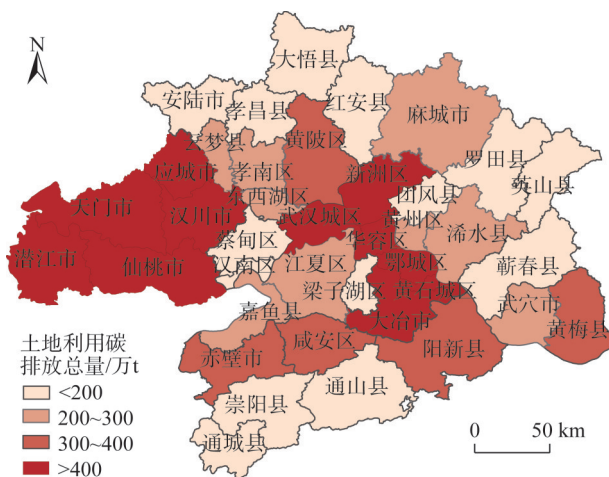


图1 武汉城市圈土地利用碳排放总量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land use carbon emission in Wuhan Urban Agglomeration



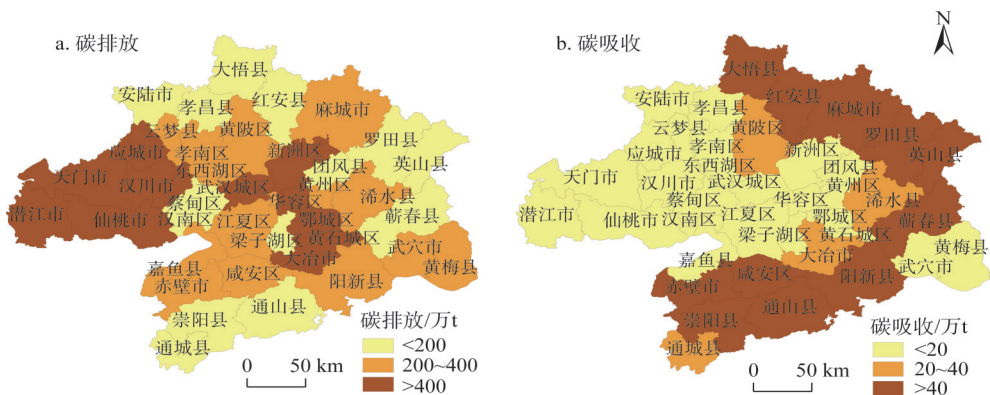


图2 武汉城市圈土地利用碳排放、碳吸收空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of net land use carbon emission and carbon absorption in Wuhan Urban Agglomeration

功能区承担了吸纳人口、经济发展和产业集聚等重任。从空间分布上看(图2a),土地利用碳排放的高值区主要分布于重点开发区,如武汉城区、黄石城区、潜江市等地区,而中、低值区主要分布于农产品主产区和重点生态功能区。这在一定程度上表明,各类型功能区土地利用碳排放与主体功能区战略定位较为吻合。

武汉城市圈整体土地利用碳排放Gini系数为0.603,处于高度不平均状态,各类型功能区呈现重点开发区(0.605)>农产品主产区(0.278)>重点生态功能区(0.174)的差异度排序,表明武汉城市圈土地利用碳排放空间分布差异较大,重点开发区内部不同县域差异度最大。单因素方差分析结果显示(表1),三种类型功能区间的土地利用碳排放差异不显著,进一步采用Mann-Whitney检验不同功能区间对土地利用碳排放的影响,仅考虑重点开发区与农产品主产区、重点生态功能区间的差异,在1%的置信水平下具有显著差异,说明主体功能区划对土地利用碳排放产生了一定的影响。因此,从土地利用碳排放视角来说,现阶段规划主要作用于重点开发区。

(2) 主体功能区划下土地利用碳吸收特征分析

根据土地利用碳汇核算公式,计算得到2015年武汉城市圈各县域土地利用碳吸收量,并借助ArcGIS平台绘制出空间分布图(图2)。从整体而言(图3),三种类型功能区的土地利用碳吸收占比顺序是:重点生态功能区

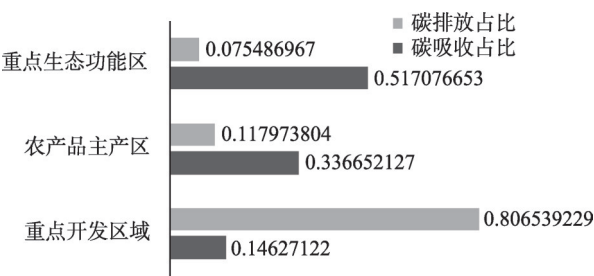


图3 各类主体功能区土地利用碳排放、碳吸收比例

Fig. 3 Land use carbon emission and carbon absorption on ratio of different Major Function Oriented Zones

表1 土地利用碳排放、碳吸收受主体功能区划影响的单因素方差分析

Table 1 The effect of Major Function Oriented Zones on land use carbon emission and carbon absorption with single factor variance analysis

		碳排放	碳吸收
方差齐性检验	Levene 统计量	2.024	9.929
	Sig.	0.147	0.000
ANOVA 检验	F 值	1.406	—
	Sig.	0.258	—
Brown-Forsythe 检验	Statistics	—	12.661
	Sig.	—	0.000

(51.71%)>农产品主产区(33.67%)>重点开发区(14.63%),重点生态功能区土地利用碳吸收占比最高,该类型功能区承担了调节区域气候、维护天然“绿心”等重任。从空间分布上看(图2b),土地利用碳吸收的高值区主要分布于重点生态功能区和农产品主产区,如大悟县、麻城市、通山县等地区。可见,在研究区内部,土地利用碳吸收与碳排放呈现出一定程度的相对空间分布趋势。

武汉城市圈整体土地利用碳吸收 *Gini* 系数为0.586,相较于土地利用碳排放虽差异度有所下降,但仍处于高度不平均状态,表明武汉城市圈土地利用碳吸收空间分布差异较大。单因素方差分析结果显示(表1),方差齐性检验未通过,进一步采用 Brown-Forsythe 检验,不同功能区间土地利用碳吸收在1%的置信水平下具有显著差异,表明主体功能区划对土地利用碳吸收具有明显影响。因此,从土地利用碳吸收视角来说,现阶段规划对各类型区域都有重要影响。

## 2.2 碳补偿分区及空间优化

### 2.2.1 碳补偿分区机制及指标选取

不同区域间土地利用碳收支空间分异显著,且经济发展水平差异较大,导致地区产生经济—生态失衡现象。为了有针对性地合理利用各区域土地、碳汇等资源,实现区域低碳、公平、可持续发展,从区域全局视角出发,通过划分碳补偿类型区,达到提高生态环境保护积极性、合理投入及低碳高效产出的目标;同时,碳补偿分区是碳补偿机制建立的前提和基础,明确区域碳补偿关系,为横向碳补偿额度及其流向提供方向性指导。

借鉴生态补偿的概念和内涵,可以将“碳补偿”理解为“一个外部性内部化的过程,碳排放主体对碳汇主体或生态保护者进行一定补偿的行为”<sup>[13]</sup>。基于此,并结合环境与自然资源经济学,可以将“碳补偿分区”的内涵和意义归纳为:(1)碳补偿分区根本目的是界定不同碳排放活动方式下碳补偿的支付区、获补区和平衡区;(2)碳补偿分区依据是研究区域土地利用碳收支影响的主要属性特性及差异;(3)碳补偿分区的主要原则是区域间的差异性和相似性、公平性、可持续发展、区域比较优势;(4)碳补偿分区实质是为横向碳补偿额度及其流向提供方向性指导,缓解各区域经济发展力与生态承载力的严重不匹配状态,实现区域间公平、可持续发展。因此,需充分考虑不同区域土地利用碳收支影响的属性特征,因地制宜地利用区域特性,发挥其最大的经济发展、农业生产及生态保护潜力。

根据已有研究成果和碳补偿分区目的,遵循能够体现区域间特征差异以及数据可获得性等原则,将影响碳补偿分区主要因素归纳为自然本底、经济、生态环境和资源结构属性4个方面。具体表征指标选取如下:(1)自然本底属性。土地利用碳排放总量是反映区域碳排放特征的重要指标之一,各个工业化和城镇化发展阶段,都将导致土地利用碳排放总量的差异性。此外,碳补偿分区的各类型区,对低碳发展的认知、接受及支持程度,最终均会直观表现在土地利用碳排放总量的变化上。因而本文选取土地利用碳排放总量作为反映自然本底属性的指标。(2)经济属性。不同经济发展水平阶段,意味着不同土地利用碳排放特征,同时,土地利用碳排放的经济贡献率随之存在较大差异。本文借鉴卢俊宇等<sup>[22]</sup>提出的碳排放经济贡献系数(Economy Contributive Coefficient, ECC),表征碳补偿分区的经济属性,从经济发展视角,衡量区域土地利用碳排放生产力的大小。(3)生态环境属性。碳汇资源具有极大生态价值,在维持生态平衡方面发挥着

重要作用,而碳汇资源保护需要巨大成本或放弃区域发展机会,这势必会影响区域空间发展公平性。因此,在碳补偿分区时,既要考虑碳排放带来的经济社会效应,又要考虑碳吸收的生态作用,将碳的生态承载系数(Ecological Support Coefficient, ESC)<sup>[22]</sup>作为表征生态环境属性指标,衡量各区域碳生态容量贡献程度。(4)资源结构属性。土地是各类社会经济活动载体,土地利用程度作为土地数量、结构、功能等的综合指标,是判定区域土地资源发展潜力重要指标,并且能够反映人类活动对土地资源干扰程度。同时,不同土地利用程度必然导致碳源、碳汇用地组合差异,进而直接影响区域碳排放和碳吸收规模。因此,本文选取土地利用程度指数<sup>[23]</sup>作为表征资源结构属性的指标。

### 2.2.2 碳补偿分区

本文尝试将比较优势理论引入碳补偿分区优势因素的判别,使各区域在发展过程中实现优势互补,缓解经济发展与环境保护的矛盾,实现区域间公平、可持续发展。基于上文对碳补偿分区主要影响因素的分析,以及表征指标的选取,运用标准显性比较优势指数(NRCA Index)测度武汉城市圈研究单元各属性的比较优势,为碳补偿分区及优化提供依据。根据自然本底、经济、生态环境和资源结构属性的指标值,利用式(6),计算武汉城市圈县域土地利用碳收支的各属性比较优势值,结果见表2。若 $NRCA > 0$ ,表示该县域此属性具有比较优势;若 $NRCA < 0$ ,表示该县域此属性不具有比较优势。依据该原则对区域优势属性进行判别,某一区域可能存在一个或多个优势属性,且比较优势指数存在差异。

由表2可知,自然本底属性:土地利用碳收支自然本底属性的优势区大多数为重点开发区域,间接反映了能源消耗规模,该属性的优势区需要重点做好节能减排工作,通过产业转型升级、避免盲目建设、提高能源利用效率等手段。经济属性:土地利用碳收支经济属性优势区主要分布在武汉城市圈中部地区,相较于其他区域,经济属性优势区的经济效率和能源利用效率均较高。而武汉城区、黄石城区等部分重点开发城市,均为土地利用碳收支经济属性劣势区,表明现阶段该类型区域的能源经济产出效率较低,可能存在粗放经济发展模式等问题。生态环境属性:土地利用碳收支生态环境属性的优势区大多分布于武汉城市圈边缘地区,地处大别山和鄂东南幕阜山,森林资源丰富,对城市圈起着水源涵养、气候调节等重要生态作用。资源结构属性:土地利用碳收支资源结构属性的优势区大多分布于西部和中部地区,其间接反映了区域土地利用程度的强弱。其中,需要对属于资源结构功能劣势区的武汉城区进行特别说明,由于该区域土地利用碳收支自然本底属性具有明显优势性,相比较而言,其他属性优势性即被相对弱化。

武汉城市圈县域各属性比较优势指数反映了不同区域的主导和辅助属性特性,有助于从整体上把握县域单元土地利用碳收支各属性优势情况及差异性,并作为武汉城市圈碳补偿分区的重要依据和导向。本文运用Matlab R 2016b的神经网络工具箱,建立SOM-K-means聚类分区模型,并结合碳补偿分区目的,依据县域各属性比较优势指数值,将武汉城市圈划分为支付区、获补区和平衡区三类。其中,支付区包括武汉城区、新洲区、黄石城区、大冶市、华容区、鄂城区、孝南区、云梦县、应城市、汉川市、黄州区、武穴市、黄梅县、仙桃市、潜江市、天门市,共16个县(市、区)单元;获补区包括阳新县、梁子湖区、大悟县、红安县、麻城市、罗田县、英山县、蕲春县、通城县、崇阳县、通山县,共11个县(市、区)单元;平衡区包括东西湖区、汉南区、江夏区、

表2 武汉城市圈土地利用碳收支各属性比较优势指数  
Table 2 NRCA index of land use carbon budget factors of Wuhan Urban Agglomeration

	自然本底	经济	生态环境	资源结构		自然本底	经济	生态环境	资源结构
武汉城区	216.40	-48.98	-104.63	-62.79	黄州区	-9.17	-10.09	-47.07	66.33
东西湖区	-11.59	44.59	-56.96	23.96	团风县	-11.17	-5.49	22.91	-6.25
新洲区	7.57	-27.27	-44.77	64.47	红安县	-14.12	-10.89	87.13	-62.13
汉南区	-19.30	89.37	-58.77	-11.30	麻城市	-6.69	-13.65	63.47	-43.13
江夏区	-14.03	85.30	-49.03	-22.24	罗田县	-9.71	-20.03	111.57	-81.83
蔡甸区	-18.14	89.08	-54.34	-16.60	英山县	-7.15	-18.94	93.63	-67.54
黄陂区	-7.66	23.69	-20.52	4.48	浠水县	-6.83	-13.12	2.49	17.46
黄石城区	24.52	-22.75	-37.02	35.25	蕲春县	-14.23	-0.01	91.29	-77.05
阳新县	0.83	-17.53	42.12	-25.43	武穴市	-3.99	-13.16	-21.52	38.67
大冶市	14.67	-24.86	-25.39	35.58	黄梅县	-3.15	-22.88	-18.95	44.98
梁子湖区	-30.88	179.34	12.88	-161.33	咸安区	0.75	-3.34	13.50	-10.91
华容区	1.76	-30.69	-41.10	70.03	嘉鱼县	-3.58	-4.97	-27.32	35.88
鄂城区	7.22	-11.36	-37.87	42.00	赤壁市	1.60	-5.51	11.69	-7.79
孝南区	-11.18	-1.89	-51.64	64.72	通城县	-5.17	-8.87	44.65	-30.61
孝昌县	-13.76	-0.16	-3.81	17.73	崇阳县	-9.95	-17.49	122.68	-95.24
大悟县	-16.03	-5.48	116.31	-94.80	通山县	-15.54	-28.92	200.47	-156.01
云梦县	-9.40	-20.14	-55.61	85.15	仙桃市	5.02	-16.65	-49.58	61.21
应城市	4.07	-38.84	-46.99	81.76	潜江市	8.79	-31.14	-54.04	76.39
安陆市	-11.97	3.59	-20.77	29.15	天门市	-3.86	-18.79	-55.40	78.05
汉川市	-4.98	-1.08	-53.67	59.74					

注：由于计算结果分布在-1/4~1/4之间，数值较小为便于分析，将所得数据扩大10000倍。

蔡甸区、黄陂区、孝昌县、安陆市、团风县、浠水县、咸安区、嘉鱼县、赤壁市，共12个县（市、区）单元。

2.2.3 功能区差别化碳补偿分区空间优化方案

在《湖北省主体功能区规划》中，除禁止开发区以外，重点开发区、限制开发区（包括农产品主产区和重点生态区）均以县域为基本单元进行划分。资源、生态、自然与经济因素相互交织作用，构成了具有区域特征的碳补偿分区，将主体功能区划与碳补偿分区相结合，进一步细化碳补偿分区方案，提出功能区差别化碳补偿空间优化方案。该分区不仅揭示了自然本底、经济、生态环境和资源结构等要素的组合特征及区域差异，而且反映了区域不同拓展方向，推动社会经济和环境保护协调发展。基于此，在ArcGIS技术支持下，将碳补偿分区和主体功能区划进行叠加分析，建立“碳补偿分区—主体功能区”二维关联矩阵，形成碳补偿空间优化结果，将武汉城市圈县域重构为7种类型区，类型区命名考虑碳补偿分区和主体功能区特征，分别命名为支付区—重点开发区、支付区—农产品主产区、获补区—农产品主产区、获补区—重点生态功能区、平衡区—重点开发区、平衡区—农产品主产区、平衡区—重点生态功能区。分区空间结果见图4，并提出区域优化发展策略。

(1) 支付区

支付区指在碳补偿行为中，需要通过经济或非经济手段进行补偿支付的区域。该区



域主要位于城市圈的中、西部地区(占城市圈内县域总数的41.03%),且大多经济发展水平较高。总体来看(表3),支付区的经济发展与碳生态承载能力处于严重不匹配状态,通过补偿支付手段可以有效缓解其对生态环境造成的负外部性影响,并提高支付区保护碳汇资源、降低碳排放的积极性。从功能划分来看,支付区包含重点开发区、农产品主产区两种功能区,补偿支付行为可以有效促进重点开发区优化产业结构、提高碳生产力、管控高碳排企业,并进一步推动农产品主产区提升农业生产效率、农业碳汇功能。

支付区—重点开发区主要由武汉城区、黄石城区、鄂城区、仙桃市等13个县(市、区)单元组成,主要位于武汉城市圈核心区和鄂中江汉平原地区,属于城市化、工业化高或较高的区域,经济发展良好(占GDP总量的71.06%),但资源环境压力极大(碳的生态承载系数均值为0.15,且土地利用碳排放总量占比为78.09%)。在今后发展中,武汉城区、新洲区作为湖北乃至全国的重要经济中心,在拓展城市空间规模时,应充分挖掘各类用地潜力,提高能源利用效率及经济效益产出,并通过碳排放总量目标来约束粗放土地利用模式;黄石城区及周边县(市、区)是重要原材料工业基地,应注意调整能源结构,通过产业转型升级来促进区域低碳发展;仙潜天三市及周边县(市、区)均是中心区域产业辐射和转移重要承接区,应发挥各区域优势资源,将产业向纵深化发展以此提高碳的生产力。

支付区—农产品主产区包括云梦县、武穴市和黄梅县。该区域为重要优质农产品基地,具有农业发展的有利条件和基础,但人类活动对其干扰程度较强。支付区—农产品主产区相较于其他农产品主产区,存在碳排放经济效益和碳汇生态功能均相对较低的情况(碳排放经济贡献系数均值为0.82,碳的生态承载系数均值为0.83)。因此,今后应充

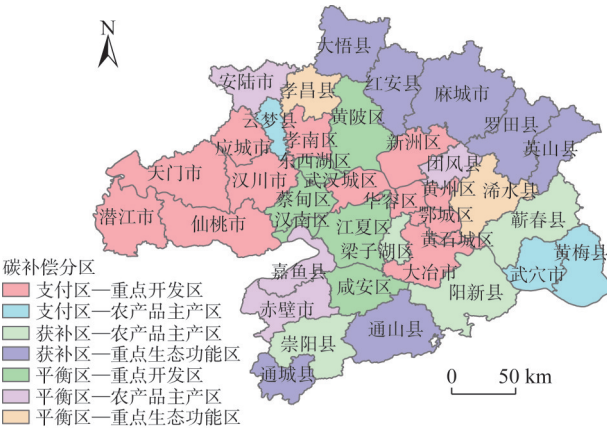


图4 主体功能区划下碳补偿空间分区

Fig. 4 Carbon compensation spatial zoning under Major Function Oriented Zones

表3 主体功能区划下碳补偿分区空间优化主要指标数据表						
Table 3 Main Indicators of carbon compensation zoning spatial optimization under Major Function Oriented Zones						
优化分区 (区域范围/县)	土地面积 占比/%	GDP 占比/%	土地利用碳 排放总量占比/%	碳排放经济 贡献系数均值	碳的生态承 载系数均值	土地利用程度 综合系数均值
支付区—重点开发区 (13)	28.56	71.06	78.09	0.85	0.15	2.88
支付区—农产品主产区 (3)	6.12	3.55	4.34	0.82	0.83	2.83
获补区—农产品主产区 (4)	13.26	3.07	2.53	1.95	7.07	2.41
获补区—重点生态功能区 (7)	24.95	4.97	3.71	0.87	8.53	2.36
平衡区—重点开发区 (6)	13.22	11.66	5.89	2.31	1.04	2.71
平衡区—农产品主产区 (4)	8.46	3.88	3.82	1.02	2.13	2.62
平衡区—重点生态功能区 (2)	5.42	1.80	1.62	1.08	2.79	2.72

分考虑并利用自然优势资源,进行合理的农业生产分工,发展区域特色农业,以此提高农业产出经济效益及农户生产积极性,并通过加强农业科技创新手段,提升农业生产效率和节能减排潜力。

## (2) 获补区

获补区指在碳补偿行为中,获得经济或非经济补偿的区域,大多主要位于城市圈外缘地区(占城市圈内县域总数的28.21%),经济发展水平较落后。总体来看(表3),获补区碳汇资源对生态环境有着较为显著的正外部性影响,其生态功能的有效保护必然限制区域发展,造成相关利益群体“暴损”现象,通过提供经济补偿和援助,可避免区域牺牲生态环境促使经济发展。从功能划分来看,获补区包含农产品主产区、重点生态功能区两种,获补偿行为可以推动农产品主产区提高耕地资源保护积极性,并激励重点生态功能区提升碳汇水平、固碳效率,通过县域碳补偿,缩小县域间经济社会发展差距。

获补区—农产品主产区由阳新县、梁子湖区、蕲春县和崇阳县组成,该区域分别处于长江中游南北两岸,水资源丰富、农业生产条件优越,与支付区—农产品主产区相比较,碳汇生态功能极为显著(碳的生态承载系数均值为7.07),且碳排放的经济效益也相对较高(碳排放经济贡献系数均值为1.95),说明现阶段获补区—农产品主产区对环境贡献力较强。今后发展应合理规划农业生产用地布局,优化农产品产业结构,以不牺牲碳的生态承载力为前提,增强农业综合生产能力和经济效益,并严格控制区域城镇化开发,稳定基本农田总量。

获补区—重点生态功能区包含大悟县、红安县、麻城市、罗田县、英山县、通城县和通山县,该区域自然生态条件较好,主要位于大别山和鄂东南幕阜山区,碳汇资源丰富、生态服务和承载功能极强(碳的生态承载系数均值为8.53),是武汉城市圈生态环境调节的重要支撑与屏障。大别山区和鄂东南幕阜山区分别是重要的土壤侵蚀防治区、水源涵养地,今后应积极推进天然林资源保护,严格控制经济建设对生态环境的影响,因地制宜地发展生态农业、生态旅游等,实现区域经济发展与环境保护并重。

## (3) 平衡区

平衡区指在碳补偿行为中,不需要支付也不获得补偿的区域。该区域大多属于武汉城区周边(占城市圈内县域总数的30.76%),受武汉城区辐射带动作用,正处于快速发展阶段,平衡区内部经济发展与碳汇生态功能处于较为匹配稳定状态。

平衡区—重点开发区由东西湖区、汉南区、江夏区、蔡甸区、黄陂区和咸安区组成,相较支付区—重点开发区,该区域碳排放量较低(土地利用碳排放总量占比为5.89%),碳汇生态功能相对较强(碳的生态承载系数均值为1.04),城市化水平、经济发展程度均一般(占GDP总量的11.66%)。东西湖区、汉南区、江夏区、蔡甸区、黄陂区作为武汉市远城区,今后可适度加大城镇化推进力度,利用武汉市空间拓展优势,发展新型工业及产业集群建设,并充分利用已有的森林碳汇资源,建设成宜业宜居的绿色生态卫星城;咸安区地处幕阜山北麓,碳汇功能较强,作为重点开发区域,在未来城镇化过程中,应注重保护区域绿色空间,避免过度开发水、土地资源,尽量在发展经济的同时,维持区域碳汇生态功能。

平衡区—农产品主产区包含安陆市、团风县、嘉鱼县和赤壁市,该区碳排放量较低,同时碳汇生态功能、经济发展水平也相对一般(碳的生态承载系数均值为2.13,占

GDP总量的3.88%),现阶段该区域无明显优势属性。作为农产品主产区,今后应在保持低碳排放量的基础上,引导区域发展循环农业,提高碳的生态承载力。

平衡区一重点生态功能区包括浠水县和孝昌县,该区域位于大别山区,碳排放量较低,但相较于其他重点生态功能区,其碳汇生态功能明显减弱(碳的生态承载系数均值为2.79)。在未来发展中,区域应严格控制工业开发,着力加强对碳汇资源的修复和保护,提升区域碳的生态承载力;并通过合理规划,适当发展经济林,在保护生态环境的同时,将资源优势转为经济优势,以此增加农民经济收入及生态建设积极性。

### 3 结论与讨论

本研究以武汉城市圈县域为典型研究区域,将土地利用碳收支过程与主体功能区划相联系,从区域土地利用碳收支角度,探讨功能分区对碳收支的影响,并以此为基础,综合考虑区域土地利用碳收支自然本底、经济、生态环境及资源结构属性特性,尝试界定区域间碳补偿关系,并提出基于主体功能区规划战略目标的差别化碳补偿空间优化方案。研究结论如下:

(1) 武汉城市圈各县域土地利用碳排放总量地区差异显著,呈现“西高东低,中心最高”空间分布格局;主体功能区划下土地利用碳排放、碳吸收均具有明显空间分异特征,其中,重点开发区碳排放占比最高,重点生态功能区碳吸收占比最高,土地利用碳吸收与碳排放呈现出一定程度的相对空间分布趋势。

(2) 从土地利用碳收支空间特征出发,基于各区域属性的比较优势指数分别划定武汉城市圈碳补偿分区的支付区、获补区和平衡区。支付区共16个县(市、区)单元,主要位于城市圈的中、西部地区;获补区共11个县(市、区)单元,大多处于城市圈外缘地区;平衡区共12个县(市、区)单元,大多属于武汉城区周边地区。

(3) 基于主体功能区规划战略目标,寻求区域“差别化”发展战略和低碳经济相匹配的空间格局,利用二维关联矩阵优化分区结果,最终形成7类碳补偿空间优化区,并提出相应的低碳发展方向及策略,为缓解区域发展与环境保护的矛盾、实现区域协调和低碳发展提供借鉴。但需要说明的是:一方面,由于县域层面上数据收集较为困难,因此,未开展相应土地利用碳收支的时间尺度变化分析;另一方面,本研究是以县(区、市)为单元展开研究的,考虑到县(区、市)内部也存在一定的差异性,可进一步以乡、镇为研究单元,以提高现实指导作用,这些都将在后续研究中加以探讨及改进。

### 参考文献(References):

- [1] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究. 南京: 南京大学, 2010. [LAI L. Carbon emission effect of land use in China. Nanjing: Nanjing University, 2010.]
- [2] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向. 中国土地科学, 2016, 12(12): 83-92. [ZHAO R Q, HUANG X J, CHUAI X W. Misunderstandings and future trends of researches on land use carbon emissions in China. China Land Science, 2016, 12(12): 83-92.]
- [3] 张梅, 赖力, 黄贤金, 等. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究. 资源科学, 2013, 35(4): 792-799. [ZHANG M, LAI L, HUANG X J, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China. Resources Science, 2013, 35(4): 792-799.]
- [4] 张善峰, 宋彦, 李昌峰, 等. 杭州市土地覆被变化与碳收支空间分异测度. 城市问题, 2015, (6): 46-53. [ZHANG S F,

- SONG Y, LI C F, et al. Land cover change and spatial difference measurement of carbon budget in Hangzhou city. *Urban Problems*, 2015, (6): 46-53.]
- [5] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201. [FAN J. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [6] 文兰娇, 张晶晶. 国土空间管制、土地非均衡发展及外部性研究: 回顾与展望. 中国土地科学, 2015, 29(7): 4-12. [WEN L J, ZHANG J J. Progress and trends of land spatial regulation, unbalanced development and spatial externalities. *China Land Science*, 2015, 29(7): 4-12.]
- [7] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 等. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议. 地域研究与开发, 2015, 34(5): 116-120. [ZHAO R Q, LIU Y, LI Y X, et al. Overview of regional carbon compensation: Mechanism, pattern and policy suggestions. *Areal Research and Development*, 2015, 34(5): 116-120.]
- [8] 石利斌. 城市水源地生态补偿分区与管治研究. 北京: 首都经济贸易大学, 2014. [SHI L B. Research on ecological compensation zones and governance in urban water sources. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2014.]
- [9] 周小平, 宋丽洁, 柴铎, 等. 区域耕地保护补偿分区实证研究. 经济地理, 2010, 30(9): 1546-1551. [ZHOU X P, SONG L J, CHAI D, et al. Empirical research on zoning of externalities compensation for regional cultivated land protection. *Economic Geography*, 2010, 30(9): 1546-1551.]
- [10] 沈田华. 三峡水库重庆库区生态公益林补偿机制研究. 重庆: 西南大学, 2013. [SHEN T H. Study on ecological forest compensation mechanism of the Chongqing Reservoir Area in Three Gorges. Chongqing: Southwest University, 2013.]
- [11] 李颖. 农业碳汇功能及其补偿机制研究. 泰山: 山东农业大学, 2014. [LI Y. Study on agricultural carbon sink function and compensation mechanism. Taishan: Shandong Agricultural University, 2014.]
- [12] 丁雨莲. 碳中和视角下乡村旅游地净碳排放估算与碳补偿研究. 南京: 南京师范大学, 2015. [DING Y L. Net carbon emissions estimates and carbon offsets in rural tourism destinations from a carbon neutral perspective. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.]
- [13] 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. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1675-1687. [ZHAO R Q, LIU Y, MA L, et al. County-level carbon compensation of Henan province based on carbon budget estimation. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1675-1687.]
- [14] 曾德珩, 李生萍, 吴雅, 等. 重庆市五大功能区碳失衡及其对策. 经济地理, 2016, 36(8): 152-157. [ZENG D H, LI S P, WU Y, et al. Study on carbon budget imbalance problem in five functional areas of Chongqing and its countermeasures. *Economic Geography*, 2016, 36(8): 152-157.]
- [15] 张俊峰, 张安录, 董捷. 武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 595-602. [ZHANG J F, ZHANG A L, DONG J. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan Urban Agglomeration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 595-602.]
- [16] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学: D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812. [FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981-2000. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(6): 804-812.]
- [17] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469. [DUAN X N, WANG X K, LU F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystem in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 463-469.]
- [18] 张金萍, 秦耀辰, 张丽君, 等. 黄河下游沿岸地市CO<sub>2</sub>排放的时空分异. 地理研究, 2012, 31(12): 2229-2239. [ZHANG J P, QIN Y C, ZHANG L J, et al. The spatio-temporal differentiation of CO<sub>2</sub> emissions in cities along the Lower Yellow River. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2229-2239.]
- [19] YU R, CAI J, LEUNG P S. The normalized revealed comparative advantage index. *Annals of Regional Science*, 2009, 43(1): 267-282.



- [20] BALASSA B. Trade liberalisation and "revealed" comparative advantage. *Manchester School*, 1965, 33(2): 99-123.
- [21] KOHONEN T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 1982, 43(1): 59-69.
- [22] 卢俊宇, 黄贤金, 戴靓, 等. 基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析. *自然资源学报*, 2012, 27(12): 2006-2017. [LU J Y, HUANG X J, DAI L, et al. Spatio-temporal scale analysis on the equality of energy consumption carbon emission distribution in China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2006-2017.]
- [23] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 10-16. [ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 10-16.]

## Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan Urban Agglomeration

LI Lu<sup>1</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>, XU Lei<sup>2</sup>, ZHANG Jun-feng<sup>3</sup>

(1. College of Public Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. College of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, Hebei, China; 3. School of Public Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** It is of great practical significance to carry out the assessment of land use carbon budget in functional areas and construct a carbon offset zoning optimization framework to formulate low carbon strategies for each functional area, specify compensation flows, and promote coordinated regional development. When taking Wuhan Urban Agglomeration as the basic analysis unit, this paper analyzes the spatial differentiation characteristics of land use carbon budget under the MFOZ, and the classification and conducts optimization of carbon compensation types in Wuhan Urban Agglomeration with the help of some methods, such as the Normalized Revealed Comparative Advantage Index method, the SOM-K-means model, and the two-dimensional correlation matrix. The results show that there are significant regional differences in the total amount of carbon emissions in different counties of Wuhan Urban Agglomeration, and display the spatial distribution characteristics that the total amount of carbon emissions is lower in the west and higher in the east, and the highest in the center. The land use carbon emission and carbon absorption in the MFOZ have obvious spatial differentiation characteristics, which shows a certain degree of relative spatial distribution trend. Wuhan Urban Agglomeration has been divided into 16 carbon compensation payment areas, 11 carbon compensation obtaining areas and 12 carbon compensation balance areas. In combination with the strategic objectives of the MFOZ, 7 types of carbon offset space optimization areas are eventually formed, and corresponding low- carbon development directions and strategies are proposed for each type of area.

**Keywords:** Major Function Oriented Zones (MFOZ); land use carbon budget; carbon compensation zoning; space optimization; Wuhan Urban Agglomeration