

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.034.

邓灵颖, 李红波. 武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 345-353.

Deng Lingying, Li Hongbo. Spatial and Temporal Evolution of Land Use Carbon Emissions and Analysis of Driving Factors in Wuhan Metropolitan Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 345-353.

# 武汉城市圈土地利用碳排放时空演变及驱动因素

邓灵颖, 李红波

(华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 产业和人口的集中造成大量资源消耗和高额碳排放, 开展城市圈尺度的碳排放研究可以为城市圈碳减排提供科学参考和借鉴。[方法] 以遥感影像和经济社会数据为基础, 构建碳排放测算模型及时空地理加权回归模型, 探究武汉城市圈3期(2000年、2010年、2020年)土地利用碳源/碳汇时空演变规律及其影响因素的时空异质性。[结果] (1) 武汉城市圈土地利用碳排放由2000年的3129.69万t增加到2020年的14590.51万t, 年均增长8.45%; (2) 影响武汉城市圈碳排放的主要因素有产业结构, 技术水平和建设用地占比; (3) 武汉城市圈碳排放影响因素存在明显的空间异质性, 各类因素对不同区域的碳排放影响存在较大差异。[结论] 城市圈碳排放具有明显的时空异质性, 不同城市资源水平及发展重心存在差异, 从而导致碳排放水平产生变化。在进行区域碳减排政策制定和碳减排任务分配时, 应充分考虑各地的经济水平及产业结构等因素。

**关键词:** 低碳发展; 驱动因素; 时空地理加权回归模型; 武汉城市圈

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0345-09

## Spatial and Temporal Evolution of Land Use Carbon Emissions and Analysis of Driving Factors in Wuhan Metropolitan Area

Deng Lingying, Li Hongbo

(School of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** [Objective] The concentration of industries and increase in population cause large resource consumption and high carbon emissions. The research on carbon emission at metropolitan area can provide reference for carbon emission reduction policies and methods. [Methods] The spatiotemporal evolution of land use carbon sources/carbon sinks in the three periods of Wuhan metropolitan area(2000, 2010, and 2020) was explored through establishing the carbon emission estimation model and spatial-temporal geographic weighted regression model based on remote sensing image data and economic and social data. [Results] (1) The carbon emissions in Wuhan metropolitan area increased from 31,296,900 tons in 2000 to 145,905,100 tons in 2020, with an average annual growth rate of 8.45%. (2) The main influencing factors of carbon emissions in the Wuhan metropolitan area were industrial structure, technology level, and the proportion of construction land. (3) The influencing factors of carbon emissions in Wuhan metropolitan area showed an obvious spatial heterogeneity, and the impact of various factors on carbon emissions varied widely across regions. [Conclusion] Carbon emissions in urban areas have significant spatial and temporal heterogeneity, and the level of resources and focus of development varies greatly from city to city, which lead to changes in carbon emission levels. When formulating regional carbon emission reduction policies and allocating carbon emission reduction tasks, factors such as the economic level and industrial structure of each region should be fully considered.

收稿日期: 2022-10-14

修回日期: 2022-12-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41871179); 华中农业大学自主科技创新基金资助(2016RC014)

第一作者: 邓灵颖(1996—), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源利用与管理。E-mail: 964799790@qq.com

通信作者: 李红波(1972—), 男, 湖北应城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地资源利用与管理。E-mail: lih20132013@163.com

http://stbcj.paperonce.org

**Keywords:** low-carbon development; driving Factors; spatiotemporal geographically weighted regression model; Wuhan Metropolitan Area

21 世纪以来,经济飞速发展导致温室气体排放量激增,气候变化尤其是气候变暖成为全球关注的焦点问题。根据国际能源署发布的数据,中国在 2009 年已经成为全球第一大碳排放国<sup>[1-2]</sup>。基于这一严峻形势,中国在第 75 届联合国大会上做出承诺,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,在 2060 年实现碳中和。湖北作为生态大省在承担中部地区经济崛起发展压力的同时,还肩负着碳减排的重任。湖北省自然资源保护与开发“十四五”规划中提到目前湖北还存在资源粗放式利用、土地粗放式开发等制约经济发展与自然资源保护的瓶颈,亟须创新以节约和保护为目标的高效资源利用方式,探索协同推进生态优先与绿色可持续发展的经济发展新路径,以期为区域碳减排增汇提供可行的经验方法。

当前,城市群成为空间发展的主要形态。武汉城市圈作为湖北省的核心发展区域,以占全省 31.2% 的土地面积创造了 60% 以上的生产总值。作为长江中游三大城市群之一,武汉城市圈在城市化与工业化的过程中对资源和能源有较强的依赖性,因此其碳排放呈现逐年增加趋势。随着各城市之间的产业转移和产业协作逐步活跃,城市圈内部物质能量交换愈发复杂,城市间的碳排放关联更加紧密。开展以城市群为单元的碳排放研究可以明晰城市群的碳排放规律,了解城市群发展与碳减排之间的矛盾,为城市群经济发展与碳减排增汇提供科学指导。

目前国内外学者针对土地利用碳排放展开了丰富的研究<sup>[3-6]</sup>。这些研究主要集中于区域碳排放核算方法<sup>[7]</sup>、碳排放影响因素<sup>[8]</sup>、碳排放时空特征<sup>[9]</sup>、区域碳补偿分区等方面,如杨欣等<sup>[10]</sup>在计算武汉城市圈碳排放总量和碳排放强度的基础上,运用 LMDI 模型分解了武汉城市圈碳排放影响因素,结果显示,能源结构、能源效率抑制碳排放,经济水平对碳排放起促进作用;李璐等<sup>[11]</sup>在剖析土地利用碳收支分异特征的基础上,借助 SOM-K-means 方法划分碳补偿区并构建碳补偿评价体系,最终得到 7 类碳补偿优化分区;董捷等<sup>[12]</sup>以 3 E 模型为约束,构建 IFCAM 模型尝试制定武汉城市圈各县区的碳减排责任空间分配方案。Shuai 等<sup>[13]</sup>采用 STIRPAT 模型分析了 1990—2011 年 125 个国家的人口、富裕程度和技术对碳排放的影响程度,得出在全球层面碳排放的关键影响因子是富裕程度,其次是技术和人口。Liu 等<sup>[14]</sup>

在采用 SBM 模型核算 2001—2019 年长三角地区碳排放效率的基础上,运用 QAP 回归分析其影响因素。Hong 等<sup>[15]</sup>介绍了 1961—2017 年全球土地利用排放的国家、过程、温室气体和产品的具体清单,采用改进的 KAYA 恒等式分解了驱动排放的关键因素,并评估了结果对不同核算假设的不确定性和敏感性。针对碳排放影响因素的研究方法大致上可以分为两类:基于因素分解分析的方法和基于计量经济学的回归分析方法<sup>[16-17]</sup>。与分解分析法相比,计量经济分析法多采用回归分析工具来构建模型,可以灵活选择变量,以随机变量的形式引入随机因子,从而使结论更具针对性。因此,计量经济分析方法得到了更多学者的认可,更适合本文的研究目标。

武汉城市圈作为中部地区具代表性的城市群,其经济发展以及碳减排路径对其他城市群具有一定的示范引领作用及借鉴意义。明晰各城市碳排放量的影响因素对制定碳减排政策、分配碳减排任务具有现实指导意义。因此,本文以武汉城市圈为研究区域,通过构建土地利用碳排放测算模型及时空地理加权回归模型,探究武汉城市圈土地利用碳排放空间差异性及其影响因素的时空异质性,为区域制定低碳经济发展政策提供具有一定参考价值的依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

本研究的数据包括 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用栅格数据和社会经济数据。土地利用栅格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m,参考《土地利用现状分类》标准(GB/T21010-2017),将研究区土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级地类。能源消费、社会经济数据来源于湖北省统计局(<http://tjj.hubei.gov.cn/>)公布的统计年鉴。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土地利用碳排放估算 本文将土地利用类型分为碳源和碳汇两类,其中,具有碳汇作用的地类包括耕地、林地、草地、水域和未利用地;发挥碳源作用的地类有建设用地和耕地。不同的土地利用方式其碳排放效应也不同,因此本文根据不同地类的利用特点来估算碳排放量。

耕地作为人类进行农业生产经营活动的载体时表现为碳源,如农业化肥施用、农业机械使用、农膜使用和灌溉等,计算公式为:

$$E_t = E_f + E_m + E_i + E_a \quad (1)$$

式中: $E_t$  为耕地碳排放; $E_f, E_m, E_i, E_a$  分别为农田化肥生产、农业机械生产使用、灌溉和农膜使用过程中带来的碳排放。

式(1)可分解为:

$$E_t = G_f A + (A_m B + W_m C) + A_i D + F_a E \quad (2)$$

式中: $A, B, C, D, E$  为转换系数,其值参考自张俊峰等<sup>[18]</sup>研究,分别为 857.54 kg/mg, 16.47 kg/hm<sup>2</sup>, 0.18 kg/kW, 266.48 kg/hm<sup>2</sup>, 3.84 kg/mg。 $G_f, A_m, W_m, A_i, F_a$  分别为农业化肥使用量、农作物种植面积、农业机械总动力、灌溉面积、农膜使用量。

建设用地是重要的碳源,对应的碳排放主要来自工业能源消耗,但由于本文研究的部分地级市统计年鉴中缺少能源消耗量数据,因此本文参考王桂波等<sup>[19]</sup>的研究,采用二三产业产值与单位 GDP 能耗的乘积反映建设用地碳排放量。计算公式如下:

$$E_{CO_2} = GDP_{2,3} HK \quad (3)$$

式中: $E_{CO_2}$  为建设用地的碳排放量; $H$  为单位 GDP 能耗( $t$  标准煤/万元); $K$  为煤炭的能源消耗碳排放系数( $tC/t$ )。

本文运用固定系数法测算耕地、林地、草地、水域及未利用地的碳汇量(表 1),由于这几种地类的碳汇能力随时间的改变不大,且国内关于这几类用地的碳排放研究有大量数据支撑,因此本文运用碳汇系数估算土地利用碳汇量。估算公式如下:

$$T_i = S_i f_i \quad (4)$$

式中: $T_i, S_i, f_i$  分别表示第  $i$  种土地利用方式的碳排放量、面积、碳排放系数。耕地碳排放系数来自陈洋勤等<sup>[20]</sup>的研究成果,林地碳排放系数来自苏雅丽等<sup>[21]</sup>的研究成果,水域和未利用地的碳排放系数分别来自段晓男等<sup>[22]</sup>和赖力<sup>[23]</sup>的研究结果。草地的碳排放系数参考张俊峰等<sup>[18]</sup>的研究成果,针对武汉城市圈改良草地和人工草地占比较大这一现状,对方精云等<sup>[24]</sup>估算的草地碳排放系数进行修正,得到城市圈草地碳排放系数为  $-0.024 t/(hm^2 \cdot a)$ 。

表 2 2000—2020 年武汉城市圈各类用地碳排放

Table 2 Carbon emissions of different land use types from 2000 to 2020 in Wuhan metropolitan area  $10^4 tC$

年份	草地	林地	水域	未利用地	耕地	建设用地	碳汇	碳源	净碳排放
2000	-0.3419	-112.1062	-16.0416	-0.0120	123.5160	3134.6768	-0.0129	0.3258	3129.6909
2010	-0.3331	-112.1618	-17.8046	-0.0088	153.4820	7998.3543	-0.0130	0.8152	8021.5280
2020	-0.3350	-111.3155	-17.0367	-0.0097	127.8675	14591.3378	-0.0129	1.4719	14590.5084

将城市圈碳排放、碳汇按照地类一一对应空间

1.2.2 时空地理加权回归模型 时空地理加权回归模型是在地理加权回归模型的基础上提出的,GWR 模型中自变量的回归参数随空间地理位置变化而变化,而 GTWR 模型中自变量的回归参数随着时空位置的变化而变化。因此该模型相对 GWR 模型能较好地描述变量与因变量之间的时空关系。由于武汉城市圈碳排放呈不均衡的时空分布特征,碳排放具有时空非平稳性,在研究武汉城市圈碳排放效应时,有必要从局部探讨武汉城市圈碳排放的时空异质性。

表 1 不同土地利用类型碳排放系数

Table 1 Coefficient of carbon emission of different land use patterns

土地利用类型	碳排放系数 $tC/(hm^2 \cdot a)$
耕地	-0.007
林地	-0.644
草地	-0.024
水域	-0.283
未利用地	-0.005

GTWR 模型的基本表达式如下所示:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: $(u_i, v_i)$  表示第  $i$  个样本点的经纬度; $t_i$  表示观测时间; $y_i$  表示第  $i$  个样本点的因变量值; $X_{ik}$  表示第  $i$  个样本点的第  $k$  个解释变量。 $\epsilon_i$  为模型误差项, $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$  代表第  $i$  个样本点的回归常数, $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$  表示第  $i$  个样本点的第  $k$  个解释变量的回归系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 武汉城市圈土地利用碳排放分析

通过研究 2000—2020 年武汉城市圈各类土地碳排放量(表 2),结果表明:净碳排放随着年份增加而增加,从 2000 年的 3 129.69 万 t 增加到 2020 年的 14 590.51 万 t,增长了约 5 倍。建设用地为主要碳源,其碳排放量占碳排放总量的 90% 以上,并且随着时间变化呈快速增长趋势;耕地的碳排放量呈现先增后减趋势,2010 年耕地碳排放达 153.48 万 t;而发挥碳汇作用的地类中,林地的碳汇能力最强,其碳汇强度随时间变化幅度不大;其次为水域,其碳汇量随时间变化呈先增后减趋势。

化,并根据各地类面积计算出碳排放及碳汇密度,结

果如图 1,图 2 所示。

通过武汉城市圈碳排放密度空间分布(图 1)结果表明,高碳排放土地利用斑块在研究早期多集中分布于武汉市以及各市的中心城区,在 2010 年以后逐渐向武汉城市圈的西北、东南方向转移。高碳排放斑

块相较 2000 年增加了 43.69%,其明显的空间分布特征表现在多分布于水源附近。研究期内耕地的碳排放密度先增后减,而建设用地碳排放密度在研究期内增幅达到 224.02%,可以看出耕地造成的碳排放远低于建设用地对碳排放的贡献度。

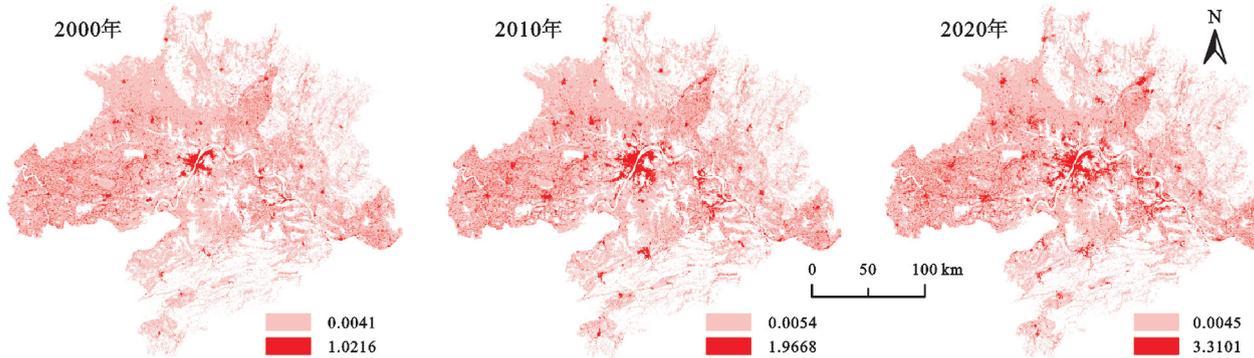


图 1 武汉城市圈 2000 年、2010 年、2020 年碳排放密度空间变化

Fig. 1 Spatial variation in carbon emission density from 2000 to 2020 in Wuhan metropolitan area

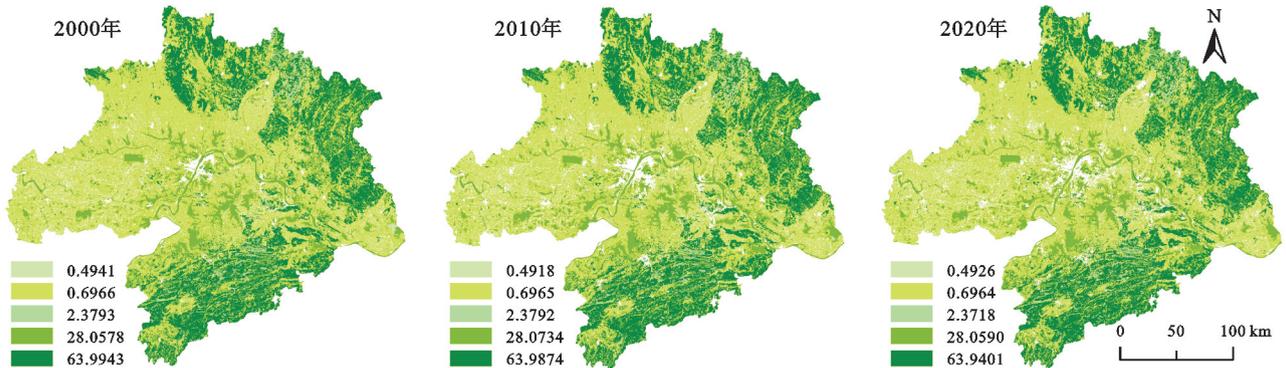


图 2 武汉城市圈 2000 年、2010 年、2020 年碳汇密度空间变化

Fig. 2 Spatial variation in carbon sink density from 2000 to 2020 in Wuhan metropolitan area

观察武汉城市圈碳汇密度空间分布(图 2)结果表明,高碳汇土地利用斑块主要分布在武汉城市圈的南部、北部以及东北部。研究期内,碳汇斑块总面积减少了 2.39%,总碳汇斑块的平均碳汇密度减少了 0.14%。武汉城市圈中心城区碳汇斑块显著减少,碳汇斑块增加区域分布在城市圈西部以及东部。

## 2.2 碳排放驱动因素分析

2.2.1 数据检验 本文运用时空地理加权回归模型(GTWR)研究武汉城市圈碳排放的驱动因素及其空间异质性,将碳排放作为被解释变量,选取城市化水平、产业结构、碳排放强度、经济发展水平、人口集聚程度、技术水平和建设用地占比 7 类因素作为解释变量。首先对这 7 类因素进行共线性诊断将方差膨胀因子(VIF)值过高的碳排放强度因素剔除,再对剩下的 6 类因素进行显著性检验,发现均对碳排放量具有显著影响,且方差膨胀因子(VIF) < 10,不存在多重共线性。各变量的指标解释及方差膨胀因子如表 3 所示。

利用 ArcGIS 时空地理加权回归分析模块,自动

设置最优带宽,时空距离参数比值设置为 1,进行影响因素回归系数计算、分析。选取 AIC 准则和拟合优度  $R^2$  作为模型置信度评价指标,结果见表 4。从拟合优度来看, $R^2$  和调整后  $R^2$  均高于 0.9,表明时空地理加权回归模型能够较好地测度解释变量对因变量的影响。

表 3 研究指标及其解释

Table 3 Research indicators and interpretation

指标名称	具体解释	VIF
城市化水平	城镇常住人口/总人口	1.351
产业结构	第二产业产值/总产值	1.284
经济发展水平	人均 GDP	1.455
人口集聚程度	单位面积常住人口	1.940
技术水平	单位 GDP 能耗	2.652
建设用地占比	建设用地占市区面积比例	2.039

2.2.2 驱动因素的时空异质性分析 (1) 通过观察 2000—2020 年各驱动因素回归系数变化图(图 3)结果表明,研究区域内的城市化回归系数既有正向又有负向且回归系数跨度较大,表明城市化进程在一定程

度上会加剧碳排放,城镇居民相对农村居民消耗的能源更高,随着城镇人口的增加城镇人类活动难以避免地会造成更多碳排放。但在研究期内湖北响应国家

发展低碳经济的号召,积极建设资源节约、环境友好型城市,倡导低碳绿色生活方式从而使城市化水平对碳排放的影响不断降低。

表 4 GTWR 相关参数

Table 4 Related parameters of GTWR

模型	Bandwidth	Residual Squares	Sigma	AICc	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Adjusted
GTWR	0.255	0.554	0.143	95.029	0.951	0.937

(2) 人口聚集程度对碳排放基本上呈现正向影响,说明人口的增加会造成更高的能源与资源的消耗,从而影响区域的碳排放水平。大部分城市的人口集聚系数随时间推移不断下降,这是由于人口的集聚带来的产业与生产要素的集中会提高能源与资源的

利用效率,从而使区域碳排放量相对降低。

(3) 经济发展水平对碳排放的贡献十分明显且均为正向影响。随着时间的推移,低碳经济的发展模型愈发完善,低碳政策成效愈发显著,使得经济发展水平系数呈现不断下降的趋势。

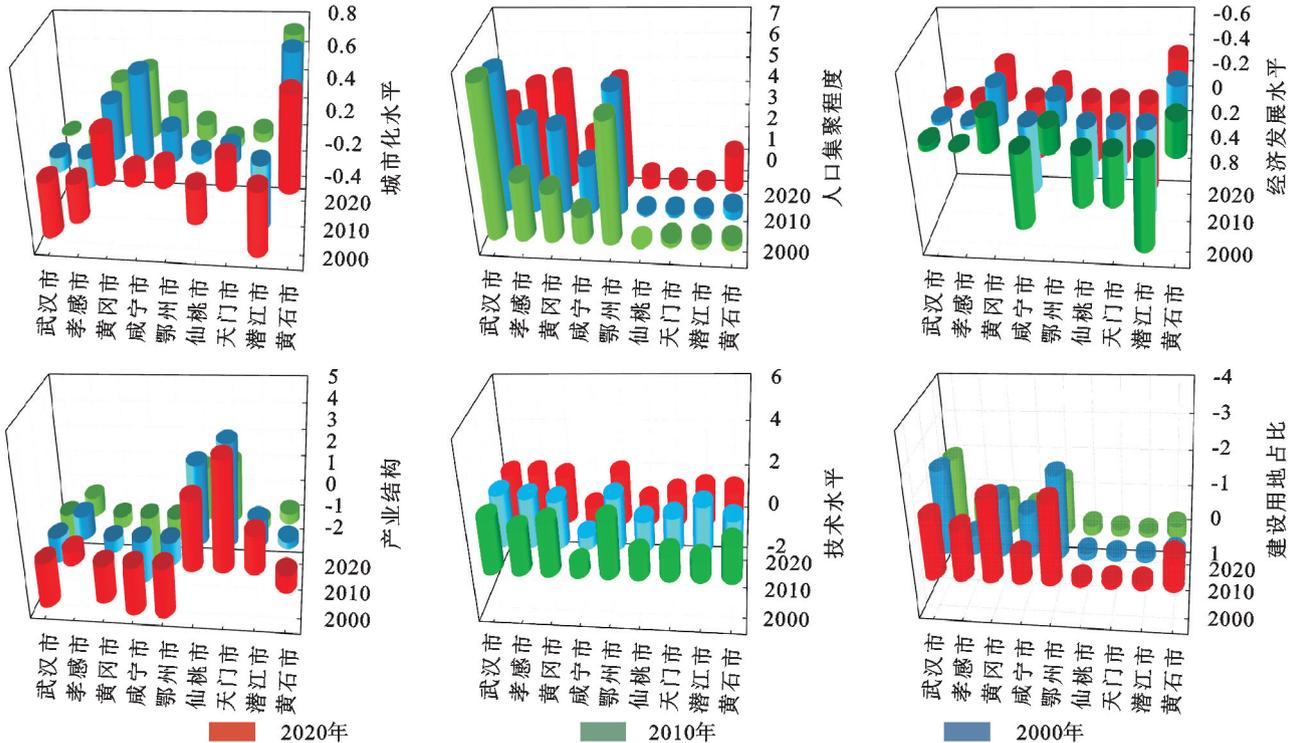


图 3 2000—2020 年各驱动因素回归系数变化

Fig. 3 Regression Coefficients of Six Driving Factors from 2000 to 2020

(4) 产业结构对碳排放的影响在研究期间基本呈现不断增加的趋势。随着二三产业的生产活动强度不断提高,加剧了煤炭资源、水资源及土地资源的消耗,从而造成更高的碳排放量。

可能是由于城市建设用地在研究期间内快速扩张,但又受到集约利用的影响,使得研究后期建设用地的使用更加集约高效。

(5) 技术水平对碳排放呈现明显的正向作用,并且在研究期间呈先增后减的趋势。其原因可能是在研究初期随着城市化进程加快对能源的需求量更大,导致碳排放量不断增加;而随着产业结构的转型及生产技术的提高,单位 GDP 能耗不断下降造成碳排放量也逐渐降低。

2.2.3 驱动影响因素空间异质性分析

将各影响因素回归系数通过 ArcGIS 进行可视化,得到各影响因素回归系数的时空分布图。结果表明,城市化水平对碳排放的影响(图 4)呈现西北较高东部较低的格局。城市化水平对潜江市的碳排放贡献率最大,其次是武汉市、孝感市,较弱的有黄冈市和黄石市。从变化趋势来看,大部门城市相关系数逐年下降,而仙桃市及潜江市回归系数经历了由负转正的过程,其原因是研究初期城市化带来的集中规模经营对碳

(6) 在研究期间,建设用地占比对碳排放大多呈负向影响,但总体上呈现逐年递增的趋势。究其原因

排放具有抑制作用,而研究后期随着产业规模的扩大及城市化占用建设用地数量增加,城市化对碳排放起正向促进作用。

产业结构的回归系数(图4)主要呈现两边高中间低的格局。武汉城市圈主城区的产业结构回归系

数一直较小,这是由于二三产业较多集中在远离武汉城市圈中心城区的偏远地级市。产业结构对天门市的碳排放影响最大,其次是仙桃市、孝感市和潜江市。表明这些城市承担了更多钢铁、水泥等化工产品的生产活动,从而导致更高的碳排放。

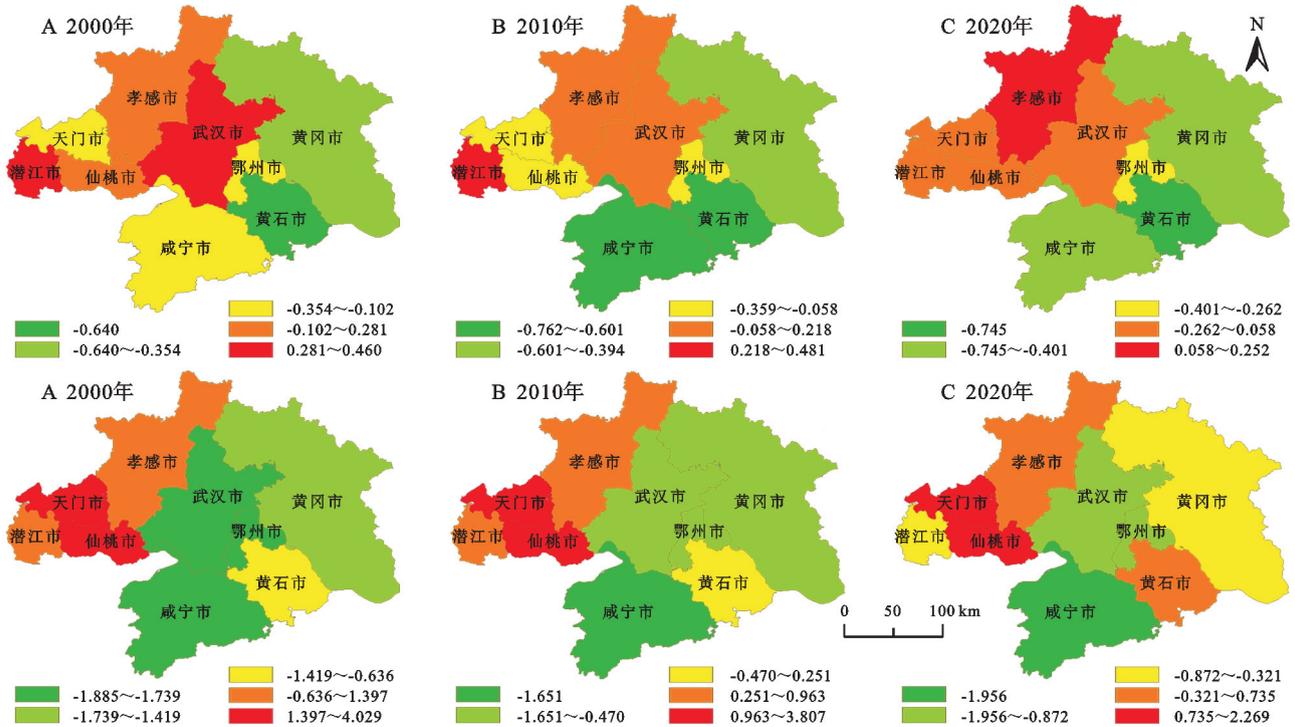


图4 城市化水平及产业结构回归系数时空分布

Fig. 4 Spatial-temporal distribution of the regression coefficients of urbanization level and industrial structure

经济发展水平对碳排放的影响(图5)呈现由西向东逐渐递减的格局。其中,经济发展水平对碳排放影响最大的城市是潜江市,其次是天门及仙桃。研究期内,武汉市及孝感市的经济发展水平回归系数呈现逐年下降并由正转负的趋势,说明研究初期经济发展对碳排放有促进作用,随着高速经济发展模式向绿色可持续经济发展的转变,经济发展水平对碳排放呈现一定的抑制作用。

人口聚集程度对碳排放的影响(图5)呈现西北部偏高东北部偏低的特点。人口集聚水平对天门的碳排放影响最大,其次是仙桃、潜江及咸宁。从变化趋势来看,除鄂州、黄石的人口集聚程度回归系数逐年递增外,其余城市的回归系数随年份增加不断减小,这是因为人口集中导致资源与生产要素在空间聚集,从而提高了资源的利用率达到降低碳排放的效果。

技术水平对碳排放的影响(图6)呈现东北部偏高南部偏低的格局。技术水平对鄂州市的碳排放影响最大,其次为武汉和孝感,较低的是咸宁市。随着时间推移,孝感市、咸宁市的系数逐年减小,说明提升技术水平有利于提高能源利用效率,降低碳排放。武

汉市、黄冈市的回归系数呈增加趋势,表明技术水平对该区域的碳排放影响作用不断增强,有必要优化调整该区域的能源结构。

建设用地占比对碳排放的影响(图6)基本上呈东高西低格局。建设用地占比对潜江市的碳排放影响最大,其次是黄石市和黄冈市。在研究初期,建设用地对潜江、黄石、黄冈、咸宁及鄂州的碳排放均为正向影响,这是由于这些城市在早期发展过程存在粗放扩张建设用地、低效率利用土地等问题,随着年份增加,城市土地利用规划要求集约利用建设用地,有效提高了建设用地的利用效率,从而降低建设用地占比对碳排放的影响。

### 3 讨论

本文按照不同用地类型分别核算了3期武汉城市圈土地利用碳排放量,并探讨了碳排放量的空间分布格局及影响因素的时空异质性。研究发现,武汉城市圈各地市的碳排放差异显著,整体上碳排放逐年增加,其中建设用地碳排放强度增加幅度最为明显。由于本研究在核算碳汇时采用系数法,且研究

期内不同用地类型的面积变化幅度较小,因此碳汇量的变化也很小。

通过以上分析,结果表明不同时间阶段各城市碳排放主导因素有明显变化。这说明了各地区存在发展不均衡的问题,因此,在区域碳减排任务的分配以及制定碳减排策略时应有针对性地考虑地域实际情

况及发展特点。如鄂州市、武汉市、孝感市碳排放受技术水平影响较大,针对这些地区的碳减排措施可以以推广绿色环保的生产技术为主,同时可以开发使用风能、光伏等低碳能源来降低碳排放。此外,天门市、仙桃市及潜江市碳排放受产业结构影响较大,应调整当地二三产业比例,推进产业结构升级转型。

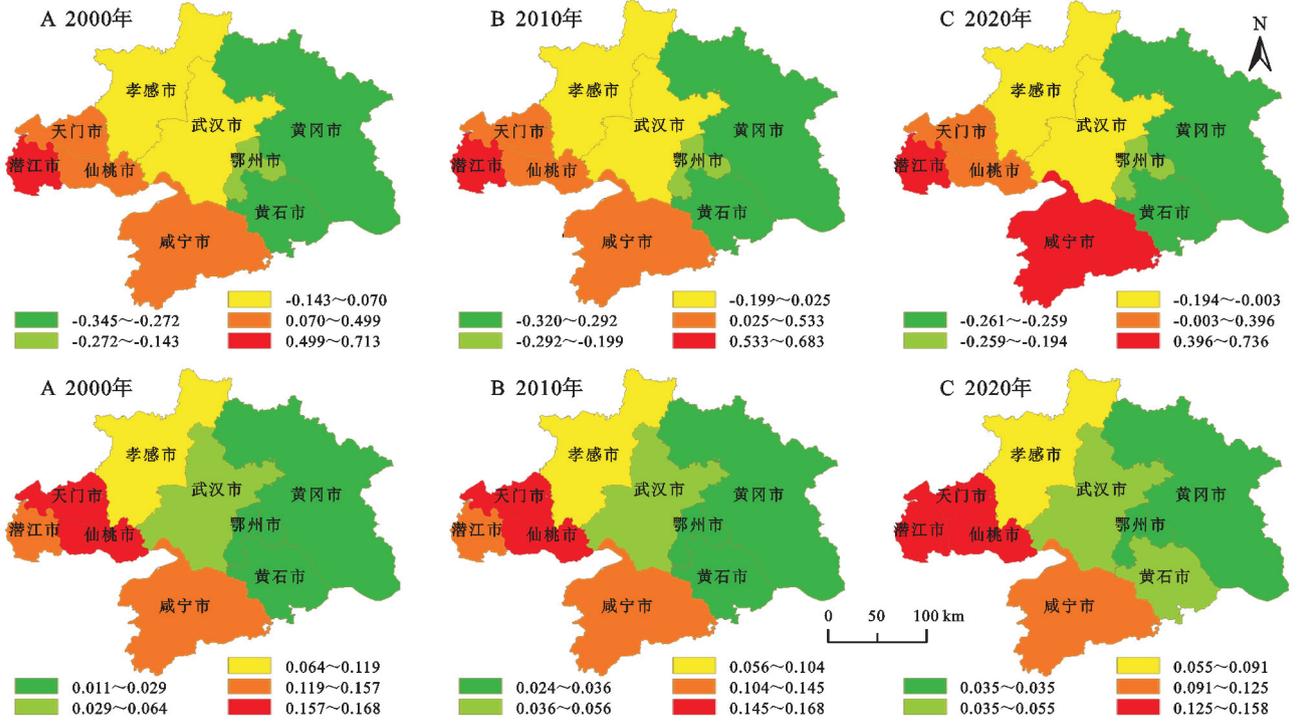


图 5 经济发展水平及人口集聚程度回归系数时空分布

Fig. 5 Spatial-temporal distribution of the regression coefficients of economic development level and population concentration

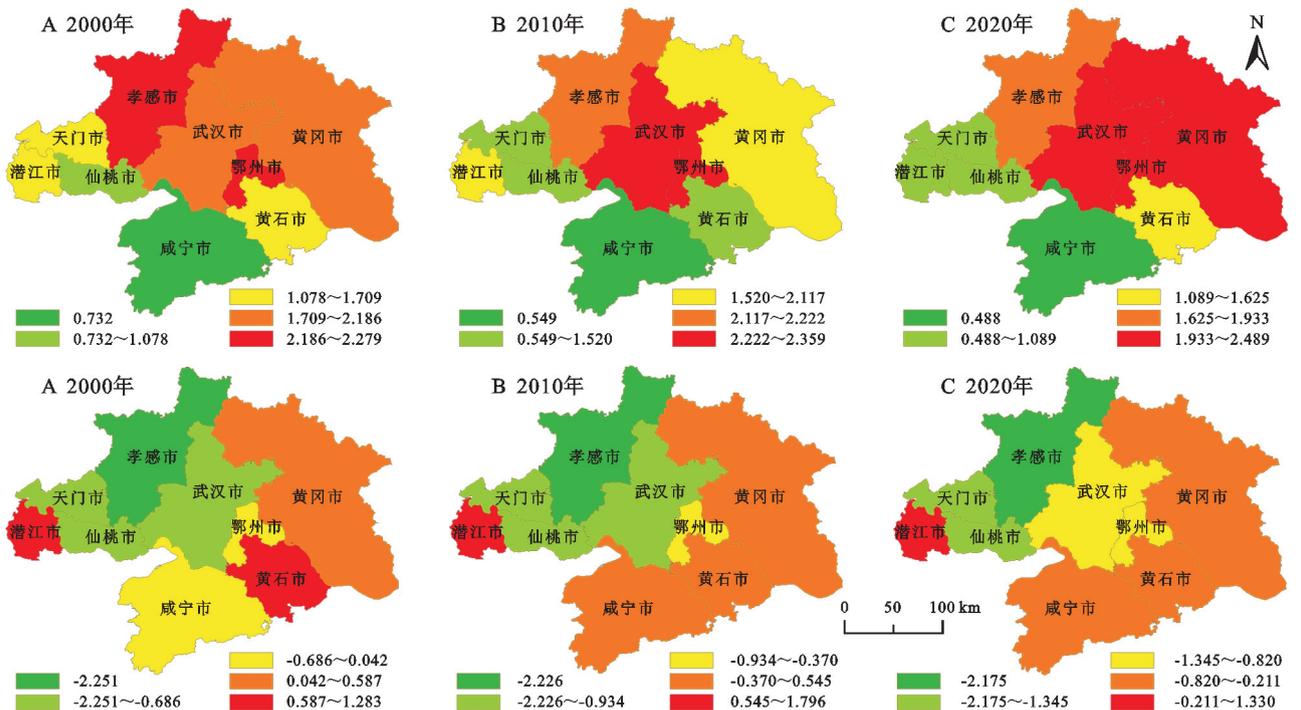


图 6 技术水平及建设用地占比回归系数时空分布

Fig. 6 Spatial-temporal distribution of the regression coefficients of technical level and proportion of construction land

## 4 结论

(1) 武汉城市圈土地利用碳排放呈逐年增加趋势。建设用地为主要碳源,其碳排放量占碳排放总量的90%以上,并随时间增长快速增加;林地为主要碳汇,其碳汇量变化相对稳定。从空间分布来看,研究期间高碳排放斑块不断增加,并逐渐由主城区向西北、西南方向转移;高碳汇斑块面积不断减少,且多分布于武汉城市圈远城区。

(2) 2000—2020年,建设用地占比对碳排放的影响程度不断增加,城市化水平、人口集聚程度对碳排放的影响程度不断降低。产业结构、经济发展水平及技术水平对碳排放的影响呈现波动变化的趋势。

(3) 武汉城市圈碳排放的影响因素存在较明显的空间异质性,最主要的影响因素是产业结构,其次是技术水平及建设用地占比。各类影响因素对不同区域的碳排放影响不尽相同,说明各地区的差异化发展造成当地碳排放主导驱动因素存在差别。

### 参考文献:

- [1] Yu A, Lin X R, Zhang Y T, et al. Analysis of driving factors and allocation of carbon emission allowance in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 74-82.
- [2] 李丹丹,刘锐,陈动.中国省域碳排放及其驱动因子的时空异质性研究[J].*中国人口·资源与环境*, 2013, 23(7): 84-92.
- Li D D, Liu R, Chen D. Research on Space-time Heterogeneity of Carbon Emission and Influencing Factors in Provinces of China[J]. *Chinese · Resources and Environment*, 2013, 23(7): 84-92.
- [3] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].*生态学报*, 2015, 35(17): 5898-5907.
- Ma X Z, Wang Z. Progress in the Study on the Impact of Land-use Change on Regional Carbon Sources and Sinks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [4] Dong F, Li J Y, Wang Y, et al. Drivers of the decoupling indicator between the economic growth and energy-related CO<sub>2</sub> in China: A revisit from the perspectives of decomposition and spatiotemporal heterogeneity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 631-658.
- [5] Xue L M, Meng S, Wang J X, et al. Influential factors regarding carbon emission intensity in China: A spatial econometric analysis from a provincial perspective[J]. *Sustainability*, 2020, 12(19): 8097.
- [6] Chuai X W, Feng J X. High resolution carbon emissions simulation and spatial heterogeneity analysis based on big data in Nanjing City, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 828-837.
- [7] 郑文超,文琦.宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J].*水土保持研究*, 2020, 27(1): 207-212.
- Zhen W C, Wen Q. Change of land use and the carbon emission effect of Ningxia autonomous region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 207-212.
- [8] 陈占明,吴施美,马文博,等.中国地级以上城市二氧化碳碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型[J].*中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 45-54.
- Chen Z M, Wu S M, Ma W B, et al. Driving forces of carbon dioxide emission for China's cities: empirical analysis based on extended STIRPAT Model [J]. *Chinese · Resources and Environment*, 2018, 28(10): 45-54.
- [9] 周夏飞,於方,曹国志,等.2001—2015年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系[J].*水土保持研究*, 2019, 26(1): 76-81.
- Zhou X F, Yu F, Cao G Z, et al. Spatiotemporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Qinghai-Tibet plateau grassland ecosystem during 2001—2015 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 76-81.
- [10] 杨欣,蔡银莺,张安录.武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究:基于2001—2009年市级面板数据的实证[J].*长江流域资源与环境*, 2013, 22(11): 1389-1396.
- Yang X, Cai Y Y, Zhang A L. Spatial-temporal characteristic and affecting factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban circle from 2000 to 2009 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(11): 1389-1396.
- [11] 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.
- Li L, Dong J, Xu L, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A Case study of Wuhan urban agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1003-1015.
- [12] 董捷,魏旭华,陈恩.土地利用碳排放地域差异下减排责任分摊研究:以武汉城市圈为例[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(4): 872-882.
- Dong J, Wei X H, Chen E. Research on the liability sharing of carbon emission reduction under the regional

- difference of land use carbon emission: A case study in Wuhan urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(4): 872-882.
- [13] Shuai C Y, Shen L Y, Jiao L D, et al. Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences from panel and time-series data of 125 countries from 1990 to 2011[J]. *Applied Energy*, 2017, 187: 310-325.
- [14] Liu C, Tang R, Guo Y, et al. Research on the structure of carbon emission efficiency and influencing factors in the Yangtze river delta urban agglomeration [J]. *Sustainability*, 2022, 14(10): 6114.
- [15] Hong C, Burney J A, Pongratz J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961—2017 [J]. *Nature*, 2021, 589: 554-561.
- [16] 吴小影, 杨山, 尹上岗, 等. 基于 GTWR 模型的长三角地区城市建设用地时空动态特征及其驱动机理[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(11): 2594-2606.
- Wu X Y, Yang S, Yin S G, et al. Spatial-temporal dynamic characteristics and its driving mechanism of urban built-up area in Yangtze river delta based on GTWR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11): 2594-2606.
- [17] 顾张锋, 徐丽华, 马淇蔚, 等. 浙江省都市区碳排放时空演变及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1524-1539.
- Gu Z F, Xu L H, Ma Q W, et al. Spatio-temporal evolution of carbon emissions in metropolitan areas and its influencing factors: A case study of Zhejiang province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1524-1539.
- [18] 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[J]. *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 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 595-602.
- [19] 王桂波, 韩玉婷, 南灵. 陕西省土地利用碳排放效应时空差异分析[C]//2011 年中国土地学会学术年会论文集, 2011: 263-270.
- Wang G B, Han Y T, Nan N. Temporal-spatial Variance of Carbon Emission Effect in Shaanxi's Land Use [C]// *Proceedings of the 2011 Annual Conference of the Land Society of China*, 2011: 263-270.
- [20] 陈泮勤, 王效科, 王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Chen B Q, Wang X K, Wang L M. Carbon budget of terrestrial ecosystems in China and countermeasures for increasing carbon sink[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [21] 苏雅丽, 张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 152-156.
- Su Y L, Zhang Y F. Study on effects of carbon emission by land use patterns of Shaanxi province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 152-156.
- [22] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. *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 ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 463-469.
- [23] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学图书馆, 2011.
- Lai L. Study on carbon emission effect of land use in china[D]. Nanjing: Nanjing University Library, 2011.
- [24] 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.
- Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of terrestrial vegetation carbon sink in china from 1981 to 2000[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(6): 804-812.