

# 河南省城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制分析

李效顺<sup>1,2</sup>, 李志鑫<sup>2</sup>, 谢晓彤<sup>1,3\*</sup>, 刘希朝<sup>1,2</sup>, 陈姜全<sup>1,2</sup>, 李奕菲<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 中国资源型城市转型发展与乡村振兴研究中心, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 公共管理学院, 徐州 221116;  
3. 河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450046)

**摘 要:** 以往对城镇化与碳排放关系的研究, 通常强调“人”的作用, 而忽视“人-地-碳”的耦合效果。为探索城镇化、碳排放与“三生”空间的交互机制, 该研究基于 DNA 模型三级结构视角, 构建城镇化、碳排放与“三生”空间耦合模型, 并采用环境库兹涅茨曲线、Logistic 方程和脱钩分析方法, 对三者间存在的数量关系进行验证和分析, 以揭示其交互机制。结果表明: 1) 人口与土地城镇化导致生态、生产、生活空间结构失衡, 影响生态环境品质, 表现出城镇化发展水平与碳排放水平严重负脱钩, 伴随城镇化升级推进, 生产、生活、生态空间将进一步融合, 空间布局将趋于协调, 严重负脱钩逐步向适度耦合转型, 逐渐形成“人-地-碳”最佳耦合关系。2) 河南省城镇化率与碳排放量间存在显著的倒“U”型曲线关系, 两者脱钩状态表现出较强的阶段性, 整体呈现“增长负脱钩向强脱钩转变, 间歇性夹杂弱脱钩与增长耦合”的特点, 并预测河南省将在 2026 年实现碳达峰, 随后进入碳减排阶段。3) 河南省“三生”空间总体呈现生产空间有序减少、生活空间稳步扩张、生态空间稳定发展的趋势, “三生”空间变化与碳排放相关关系表现为生产空间对碳排放的贡献增加, 生活空间对碳排放的贡献减小, 生态空间对碳排放的贡献基本稳定, 由此提出空间布局应减缓生活空间扩张, 提高生态空间占比增加碳汇, 降低生产空间产生的碳排放。研究结果能够为区域新型城镇化建设、双碳战略实施提供定量参考和决策依据。

**关键词:** 土地利用; 功能; 生态; 城镇化; 碳排放; “三生”空间; DNA 模型; 河南省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302159

中图分类号: F301.2; X22

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0256-10

李效顺, 李志鑫, 谢晓彤, 等. 河南省城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 256-265. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302159 <http://www.tcsae.org>

LI Xiaoshun, LI Zhixin, XIE Xiaotong, et al. Analysis of the interaction mechanism of urbanization, carbon emissions, and production-living-ecological space in Henan Province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 256-265. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302159 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

城镇化是人类社会经济发展的重要标志和必然趋势, 与碳排放密切相关<sup>[1-2]</sup>。《世界能源统计年鉴(第 70 版)》指出, 中国碳排放量占全球碳排放总量的 30.7%, 远超其他地区。在高碳排放、高增长速率的背景下, 平衡城镇化发展和节能减排间的关系是城镇化进程中亟待解决的重要现实问题, 而城镇化进程中人口和经济等要素集聚, 在空间上表现为生产、生活、生态空间的动态变化, 这种动态变化会对环境产生不同程度的影响。因此, 构建城镇化、碳排放与“三生”空间交互模型, 开展三者间交互机制分析, 对实现新型城镇化和双碳战略具有重要意义。

学术界对城镇化与碳排放作用机制的研究相对成熟, 如王志强等<sup>[3]</sup>首先构建了城镇化碳排放核算体系; 任晓松等<sup>[4-7]</sup>学者研究发现, 城镇化与碳排放之间存在交互关系, 且城镇化与居民消费、能源结构、人口规模、人口空间分布、产业结构等要素结合, 共同影响碳排放, 并形成长期均衡的关系。城镇化可通过生产、生活、技术、贸易、行政管理嵌套的体系结构或空间关联等途径影响碳排放<sup>[8]</sup>。GUO 等<sup>[9-11]</sup>学者研究发现城镇化水平是造成区域碳排放差异的重要因素, 城镇化对碳排放的影响程度随城镇化发展阶段呈现“先增后减”的趋势。目前学术界对“三生”空间与碳排放的研究, 多以时空特征分析和耦合关系研究为主。党的十八大报告中最早提出“三生”空间的概念, 并依据生态文明建设要求对国土空间主体功能进行了定向划分, 用于分析城市空间结构失衡、规模等级不合理<sup>[12]</sup>等问题。杜金霜等<sup>[13]</sup>认为“碳”是区域水、土、能等资源耦合开发利用的重要体现形式, 不仅统筹区域“三生”空间各种资源的利用以及组合关系, 还引导和倒逼区域“三生”空间优化升级。林刚等<sup>[14]</sup>采用“碳流”模型和生态网络分析方法, 探究区域“三生”空间演进过程对碳代谢的影响, 为区域“三生”空间统筹优化方法提供理论指导。

综上所述, 城镇化进程中的碳排放通常基于产业、

收稿日期: 2023-02-27 修订日期: 2023-05-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71874192); 江苏省社科优青、重点基金项目(19GLA006); 江苏省社科联重大应用研究课题(23WTA-001)中央高校基本科研业务费重大项目培育专项基金(2020ZDPY0219; 2022ZDPYSK08)

作者简介: 李效顺, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为城镇化与国土空间规划。E-mail: lxsh@cumt.edu.cn

※通信作者: 谢晓彤, 博士, 讲师。研究方向为城镇化与国土空间规划。E-mail: xxtong0120@163.com

人口、经济等因素进行分析，并强调“人”的作用，而忽视了“人-地-碳”耦合时空变化对碳排放的影响效应。鉴于此，本研究按照“理论分析-模型构建-实证研究”的逻辑思路，从 DNA 模型三级结构视角切入，构建城镇化、碳排放与“三生”空间耦合模型，揭示三者交互机制，并采用环境库兹涅茨曲线、Logistic 方程和脱钩分析方法，以河南省为例开展实证分析，以期为区域城镇化建设中双碳目标的实现提供科学依据和理论支持。

1 理论分析与研究方法

1.1 理论分析

为科学构建耦合模型并提升实证研究结果的可靠性，

有必要加强理论分析并首先明确“三生”空间基本内涵。本文在现有土地利用分类体系的基础上，将“三生”空间对应为不同土地利用类型，即参考国家土地利用分类方法，结合土地利用/土地覆盖变化（land-use and land-cover change，简称 LUCC）遥感监测数据分类系统，将土地利用类型归纳为包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地在内的6个一级类型和有林地、灌木林、疏林地、其他林地和草地等 25 个二级类型<sup>[15]</sup>。基于此，遵循土地利用的多功能性，将“三生”功能与土地利用主导功能进行融合，归并基础数据中的各用地类型，进而构建基于土地利用类型的“三生”空间分类方案<sup>[16]</sup>，具体如表 1 所示。

表 1 “三生”空间分类与土地利用分类对应关系

Table 1 Correspondence between spatial classification of production-living-ecological space and land use classification			
序号 No.	“三生”空间分类 Classification of “production-living-ecological” space		对应土地利用类型 Corresponding land use type
	一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	
			一级类 Primary classification
1	生产空间	农业生产空间	耕地
		工矿生产空间	城乡、工矿、居民用地
2	生活空间	城镇生活空间	城乡、工矿、居民用地
		农村生活空间	城乡、工矿、居民用地
		绿地生态空间	林地、草地
3	生态空间	水域生态空间	水域
		其他生态空间	未利用地
			有林地、灌木林地、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、河、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地、沼泽地、沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石质地、其他未利用地

通过总结城镇化与“三生”空间格局的交互机制，城镇化发展过程中人口向城市的迁移会影响“三生”空间分布格局，而“三生”空间结构变化又将对人口城镇化产生不同效果<sup>[11,16-17]</sup>。城镇化率的提高伴随着人口向城市聚集，促进生活空间稳步扩张和农业生产空间不断减少。“三生”空间格局是影响城镇化进程的重要因素，生产、生活和生态空间的适宜程度越高，人口城镇化的速度将会越快。因此，城镇化与“三生”空间的交互作用存在类似 DNA 双螺旋结构的关系。

DNA 是一种包含生物遗传信息的核酸，由 2 条反向平行的螺旋状多聚核苷酸链组成一个双螺旋结构<sup>[18]</sup>。在空间上具有三级结构，一级结构指 4 种碱基不同的脱氧核苷酸分子；二级结构指 2 条反向平行的核苷酸链通过碱基对间的氢键作用形成的双螺旋结构；三级结构（高级结构）指 DNA 双螺旋进一步扭曲盘绕所形成的更复杂的特定空间结构。类比 DNA 模型的三级结构，对城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制进行分析（图 1）。一级结构：城镇化率和“三生”空间的结构；二级结构：城镇化与“三生”空间的交互关系，一方面城镇化率的提高依赖于城镇人口的增加，而城镇人口增加导致生活空间增加，城镇化率对“三生”空间的影响构成了模型的第一类“碱基对”。另一方面，“三生”空间结构变化又反作用于城镇化率，生产空间和生活空间的变化对城镇人口产生不同的影响，当生产和生活空间扩张时，城镇空间对非城镇人口的吸引作用增强，城镇人口增长

速率将增加，城镇化率提高。

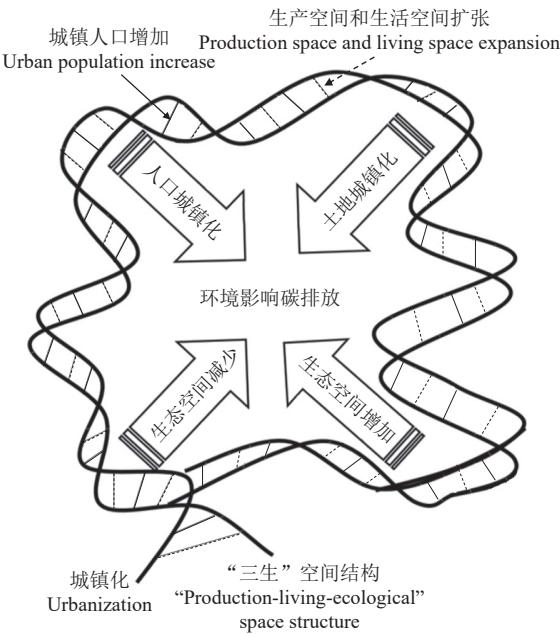


图 1 城镇化、碳排放与“三生”空间交互模型的三级结构  
Fig.1 The three-level structure of the interaction model between urbanization, carbon emissions, and the production-living-ecological space

因此，“三生”空间对城镇化的影响构成此模型的第二类“碱基对”；高级结构：城镇化与“三生”空间的相互作用在环境方面产生的影响构成了此模型的高级

结构, 表现为城镇化与“三生”空间变化带来的碳排放。在三级结构的基础上, DNA 双螺旋结构在空间中的回旋上升体现为城镇化与“三生”空间共同影响下碳排放增加的过程。

## 1.2 模型构建

在理论分析基础上, 本文耦合 Logistic (S 型) 曲线方程、环境库兹涅茨 (environment Kuznets curve, EKC) 曲线和脱钩分析方法, 构建城镇化、碳排放与“三生”空间耦合模型, 以揭示三者交互机制。

### 1.2.1 城镇化趋势曲线

美国城市地理学家 Northam 将城市化过程所经历的轨迹概括为生长理论曲线, 该理论认为城镇化发展是一个缓慢、加速、再减慢的过程, 其全过程会呈现出一条被拉伸拉平的“S”型曲线。在该理论的指导下, Logistic 曲线模型被广泛应用于城镇化发展趋势研究中。Logistic 模型最初用于描述生物种群增长规律, 该模型在刻画城镇化发展规律中考虑了资源环境对人口的阻滞作用<sup>[19]</sup>, 具有预测方法科学, 预测结果误差小的特点。Logistic 模型描述城镇化发展趋势如式 (1):

$$\frac{dU_t}{dt} = b \cdot U_t \cdot \left(1 - \frac{U_t}{K}\right) \quad (1)$$

式中  $U_t$  表示  $t$  年城镇化水平;  $K$  表示城镇化水平饱和值,  $0 < K \leq 1$ ,  $K$  值估算方法有 3 种<sup>[20-22]</sup>;  $b$  表示增长参数,  $b > 0$ 。

为便于确定模型回归参数, 本研究借鉴张乐勤等<sup>[23]</sup>对 Logistic 曲线模型的处理方法, 对式 (1) 变形, 得到式 (2)。

$$U_t = \frac{K}{1 + K \cdot c \cdot e^{\ln d - t}} \quad (2)$$

式中  $c$  表示模型回归常数;  $d$  表示回归系数; 本研究借助 SPSS, 通过  $K$  值估算方法中的拟合优度最大估算法<sup>[24-25]</sup>计算城镇化水平饱和值。

### 1.2.2 碳排放特征曲线

借鉴廉勇<sup>[26]</sup>在环境污染与经济层次研究中, 采用碳排放量作为环境库兹涅茨曲线 (EKC) 中环境污染代理变量的思想, 本研究选取城镇化率为自变量, 碳排放量作为环境影响的代理变量, 以 EKC 曲线表达碳排放量随城镇化率的时序变化特征。参考文献<sup>[27-28]</sup>, 构建碳排放随城镇化率变化的曲线模型, 如下式:

$$y = A + Bx + Cx^2 + D \quad (3)$$

式中  $y$  为碳排放量;  $x$  为城镇化率;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为模型的常数项、一次项和二次项待估系数;  $D$  为随机误差项。待估系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的符号不同,  $y$  与  $x$  的关系也不同。当  $B > 0$ ,  $C < 0$  时, 则  $y$  与  $x$  的关系曲线呈倒“U”型; 当  $B < 0$ ,  $C > 0$  时, 则  $y$  与  $x$  的关系曲线呈“U”型。

关于碳排放量的计算, 考虑到数据的可获取性以及研究可行性, 本研究选取当前最主流的《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的能源碳排放系数估算方法<sup>[3-7]</sup>测算碳排放量。计算方法如式 (4):

$$Y = \sum_{i=1}^n E_i \times F_i \quad (4)$$

式中  $Y$  代表总碳排放量;  $E_i$  表示能源  $i$  的消费量;  $F_i$  表示能源  $i$  的碳排放系数, 即每单位能源消费的碳排放量。

《综合能耗计算通则》(GB/T 2 589-2008) 和《省级温室气体编制指南》(发改办气候 [2011] 1 041 号) 中不同能源的标准煤折算系数和碳排放系数, 如表 2 所示。

表 2 不同能源的碳排放系数

能源种类 Energy type	碳排放系数 Carbon emission coefficient
原煤 Raw coal	1.900 3
原油 Crude oil	3.020 2
焦炭 Coke	2.860 4
燃料油 Fuel oil	3.170 5
天然气 Natural gas	2.162 2
汽油 Gasoline	2.925 1
柴油 Diesel oil	3.095 9
煤油 Kerosene	3.071 9
液化石油气 Liquefied petroleum gas	3.101 3

### 1.2.3 城镇化与碳排放耦合模型

为揭示碳排放压力下的城镇化发展质量, 本研究拟采用脱钩模型。目前测度脱钩状态的常用方法有脱钩因子法、Tapio 脱钩弹性系数法、IPAT 方程等。其中, Tapio 脱钩模型综合了总量变化和相对量变化两类指标, 能够客观准确地测度和分析脱钩关系。因此本研究选取 Tapio 脱钩系数测度城镇化率与碳排放的耦合关系, 如式 (5):

$$I_t = \frac{\Delta y_t}{\Delta U_t} = \frac{(y_t - y_{t-1})/y_{t-1}}{(U_t - U_{t-1})/U_{t-1}} \quad (5)$$

式中  $I_t$  表示  $t$  年碳排放量与城镇化率的脱钩系数,  $\Delta y_t$  为  $t$  年碳排放量的变化率,  $\Delta U_t$  为  $t$  年城镇化率的变化率。  $y_t$  和  $U_t$  分别指第  $t$  年的碳排放量和城镇化率,  $y_{t-1}$  和  $U_{t-1}$  分别指第  $t-1$  年碳排放量和城镇化率。根据  $I_t$  的大小及  $\Delta y_t$ 、 $\Delta U_t$  的取值状况, 形成 8 种脱钩状态 (表 3)。

表 3 脱钩状态判别标准

Table 3 Criteria for distinguishing decoupling state

脱钩状态 Decoupling state	脱钩 Decoupling			耦合 Coupling		负脱钩 Negative decoupling		
	强脱钩 Strong decoupling	弱脱钩 Weak decoupling	衰退脱钩 Recessionary decoupling	增长耦合 Growth coupling	衰退耦合 Recessionary coupling	增长负脱钩 Negative decoupling of growth	弱负脱钩 Weak negative decoupling	强负脱钩 Strong negative decoupling
$\Delta y_t$	<0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	>0
$\Delta U_t$	>0	>0	<0	>0	<0	>0	<0	<0
$I_t$	<0	[0,0.8)	>1.2	[0.8,1.2)	[0.8,1.2)	>1.2	[0,0.8)	<0

注:  $I_t$  表示第  $t$  年碳排放量与城镇化率的弹性脱钩系数;  $\Delta y_t$  为第  $t$  年碳排放量的变化率;  $\Delta U_t$  为第  $t$  年城镇化率的变化率, 下同。

Note:  $I_t$  represents the elastic decoupling coefficient between carbon emissions and urbanization rate in year  $t$ ;  $\Delta y_t$  is the rate of change in carbon emissions in year  $t$ ;  $\Delta U_t$  is the rate of change in urbanization rate in year  $t$ . The same below.



其中，强脱钩是最理想的状态，表明城镇化程度提高，碳排放量下降，这也是城市经济发展与生态环境建设的最终目标。强负脱钩与强脱钩状态正好相反，是最不理想状态，表明城镇化进程出现倒退而碳排放压力却不断增加。耦合则代表碳排放与城镇化发展程度相对稳定，两者变化速度基本持平。

1.2.4 城镇化、碳排放与“三生”空间交互模型

基于上述理论分析，融合 Logistic 曲线方程、环境库兹涅茨曲线和脱钩方法，本文构建城镇化、碳排放与“三生”空间交互耦合模型（图 2）；其中，“三生”空间时序演变特征，采用生产、生活、生态空间的面积度量。纵观中国城镇化发展进程，“三生”空间在城镇化各阶段分布状态不同。尤其是 1980—2020 年期间，中国的相关政策发生了两次重大变化。在 20 世纪 80 年代末 90 年代初，中国改革开放政策的实行，使得农村人口开始大量向城市聚集，进而促进城镇化率的迅速提高；2012 年后，国家首次提出乡村振兴战略，国家政策和财政向农村逐渐倾斜，进而吸引了一部分人口从城市向农村回流。基于两次政策变化对人口流动的影响，本研究拟将城镇化率分为 3 个发展阶段（即城镇化初期、中期和后期）<sup>[29]</sup>。城镇化初期（城镇化率≤30%），各类型空间由多到少依次为生产空间、生态空间、生活空间，生产空间粗放利用，生活空间零散分布，生态空间功能单一；城镇化中期（30%<城镇化率≤70%），各类型空间由多到少依次为生产空间、生活空间、生态空间，生产空间利用效率缓慢提高但仍属于低效利用，生活空间依旧无序分布，生态空间的破坏程度则加剧，环境污染、生态破坏等现象严重；城镇化后期（城镇化率>70%），生产空间利用效率进一步提高，实现高效利用，生活空间集聚分布，生态空间得到重塑，三者间分布趋于协同。

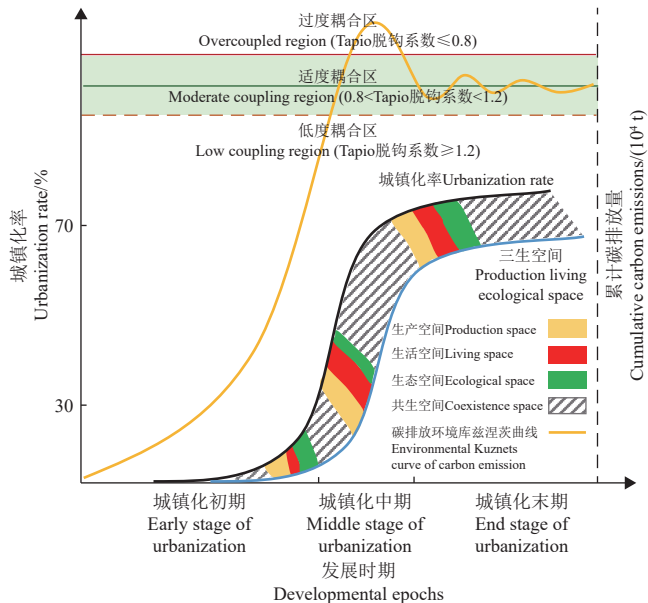


图 2 城镇化、碳排放与“三生”空间耦合交互模型  
Fig.2 Coupled interaction model of urbanization, carbon emission, and production-living-ecological space

将碳排放环境库兹涅茨曲线及城镇化率 Logistic 曲线，耦合在以城镇化发展时期为横轴的坐标系中，“三

生”空间的动态变化，采用图形面积进行直观表达（图 2）。依据城镇化与碳排放 Tapio 脱钩系数的大小，将城镇化与碳排放间的耦合关系分为 3 种，分别为低度耦合区、适度耦合区和过度耦合区<sup>[30]</sup>，Tapio 脱钩系数大于 1.2 时，耦合关系处于低度耦合区；Tapio 脱钩系数在 [0.8, 1.2] 区间时，耦合关系处于适度耦合区；Tapio 脱钩系数小于 0.8 时，耦合关系处于过度耦合区。Tapio 脱钩系数变化趋势与碳排放曲线基本相似，可采用碳排放曲线定性描述耦合关系变化，因此不再单独作曲线描述耦合关系。

2 研究区与数据处理

2.1 研究区概况

河南省界于 31°23'N~36°22'N, 110°21'E~116°E，位于中国中部、黄河中下游，土地面积 16.7 万 km<sup>2</sup>，地势西高东低，气候四季分明，植被类型丰富，自然禀赋优势突出。截至 2020 年，全省地区生产总值突破 5.49 万亿元，城镇化率达到 54.43%，能源消费总量达到 2.3 亿 t，而改革开放初，地区总产值仅为 229 亿元，城镇化率为 14%，能源消费总量仅有 3 400 万 t。40 a 间，地区生产总值增加 240 倍，城镇化率提高 40%，能源消费总量增长 6.7 倍。作为中国的农业、人口和经济大省，改革开放以来，河南省城镇化和工业化快速推进，经济发展取得瞩目成绩，与此同时，生态环境遭受的压力不断增大，国土空间格局亦受到较大影响。

2.2 数据来源与处理

根据《河南省统计年鉴》公布的城镇化率和能源消费结构数据，采用式（4）计算得到 1980—2020 年河南省年碳排放量。根据河南省 1980—2020 年的 Landsat 影像数据，通过监督分类形成 LUCC 分类体系的土地利用现状数据后，依据“三生”空间类型与土地利用分类的对应关系，利用 ArcMap10.8 对土地利用类型重分类，得到河南省“三生”空间各空间类型的面积，如表 4。

表 4 河南省“三生”空间面积  
Table 4 The area of production-living-ecological space in Henan

年份 Year	Province		
	生产空间面积 Production space area	生活空间面积 Living space area	生态空间面积 Ecological space area
1980	108 947	15 321	41 374
1990	108 770	15 409	41 430
1995	110 308	15 806	39 448
2000	108 768	16 797	40 088
2005	107 675	17 569	40 416
2010	107 176	18 432	40 043
2015	106 166	19 366	40 116
2020	104 747	20 392	40 476

3 结果与分析

3.1 城镇化率、年碳排放量与“三生”空间变化趋势

根据上文基本原理可得到 1980—2020 年河南省城镇化率、碳排放量和“三生”空间的变化趋势（图 3）。

在 2005 年之前，河南省处于城镇化初期，城镇化率与碳排放量增速基本同步，生活空间缓慢增加，生产空间在 1995 年前经历小幅增加后开始持续减少，生态空间逐渐缩小；2005 年之后，河南省进入城镇化中期，生活

空间持续扩大,生态空间基本保持不变,而生产空间持续减少,碳排放量增速剧增,城镇化率增速依旧保持平稳。总体来看,研究期内河南省城镇化率与碳排放量变化趋势基本同步,呈上升态势,碳排放量自 2015 年开始增速放缓,并趋于稳定。研究期内河南省生产空间与生态空间的变化趋势基本保持一致,2005 年之前,生产和生态空间持续减少,2005 年之后,生态空间变化幅度较小,生产空间仍存在波动减少的趋势,而生活空间 2000 年之后不断增长,到 2018 年增速放缓,趋于稳定。

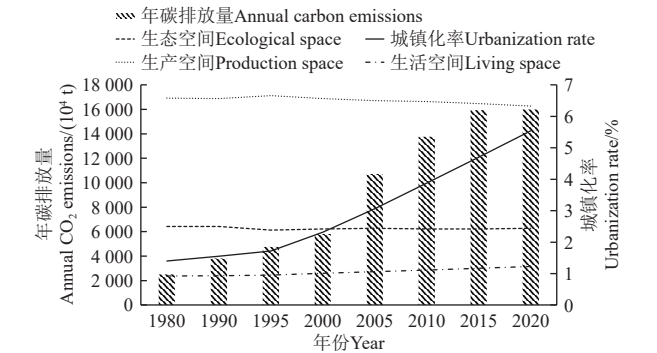


图3 河南省 1980—2020 年城镇化率、年碳排放量与“三生”空间面积变化趋势

Fig.3 Trend of urbanization rate, annual carbon emissions and area of production-living-ecological space in Henan Province from 1980 to 2020

3.2 城镇化 Logistic 曲线分析

以河南省 1980—2020 年城镇化率数据作因变量,年份  $t$  作自变量(设 1980 年  $t$  为 1),运用 SPSS 软件,选择曲线回归分析方法,对 Logistic 曲线饱和值进行赋值<sup>[23]</sup>,如表 5 所示。

表 5 Logistic 曲线饱和值与拟合效果		
Table 5 Logistic curve saturation value and fitting effect		
城镇化率饱和值 Saturation value of urbanization rate/%	决定系数 Coefficient of determination( $R^2$ )	$P$ 值 $P$ value
75	0.937	0.001
80	0.941	0.001
85	0.949	0.001
90	0.947	0.001
91	0.947	0.001
92	0.948	0.001
93	0.949	0.001

当城镇化率饱和值为 93% 时, Logistic 曲线的拟合优度最大( $R^2$  为 0.949),且通过显著性检验( $P<0.01$ ),由此表明,93% 为河南省城镇化水平 Logistic 曲线理论饱和值。以 93% 作为河南省城镇化水平 Logistic 模型上限,借助 SPSS 软件进行曲线回归分析(图 4),回归系数为 0.945,将其代入式(2)可得 1980—2020 年河南省城镇化率的 Logistic 模型,见式(6)。

$$U_t = \frac{93}{1 + 8.463e^{\ln 0.945t}}$$

(6)

依据式(6),可对河南省 2021—2030 年的城镇化水平进行预测,结果如表 6。分析表 6 发现, Logistic 模型拟合的河南省 1980—2020 年城镇化水平值与观测值的平均绝对百分比误差为 2.4%,模型拟合效果较好,并且

Logistic 曲线模型通过显著性检验( $P<0.01$ ),可以认为河南省城镇化率的变化规律符合 Logistic 曲线。

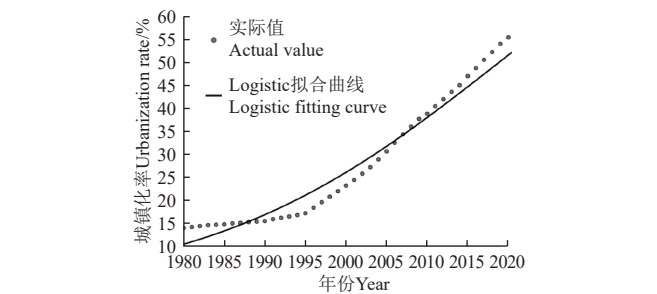


图4 河南省 1980—2020 年城镇化率 Logistic 曲线拟合图

Fig.4 Logistic curve fitting diagram of urbanization rate in Henan Province from 1980 to 2020

由表 6 可知,2025 和 2030 年河南省城镇化水平将分别达 58.42% 和 64.94%。通过计算,2021 年前,城镇化年平均增速为 1.04 个百分点,2021—2030 年,年平均增速为 1.33 个百分点,由此表明,河南省城镇化在 2021 前保持较缓发展速度,2021—2030 年,河南省城镇化速度提升,契合 Logistic 增长轨迹。

表 6 河南省城镇化水平前景预测

Table 6 The prospect prediction of urbanization level in Henan Province

Province						%
年份 Year	拟合值 Fitted value	观测值 Observed value	年份 Year	拟合值 Fitted value	观测值 Observed value	
1980	10.47	14.00	2006	32.97	32.50	
1981	11.00	14.20	2007	34.20	34.34	
1982	11.55	14.40	2008	35.45	36.03	
1983	12.13	14.60	2009	36.73	37.70	
1984	12.73	14.70	2010	38.02	38.82	
1985	13.35	14.80	2011	39.33	40.47	
1986	14.01	15.00	2012	40.66	41.99	
1987	14.69	15.10	2013	42.00	43.60	
1988	15.39	15.30	2014	43.35	45.05	
1989	16.13	15.40	2015	44.71	47.02	
1990	16.89	15.50	2016	46.08	48.78	
1991	17.68	15.90	2017	47.46	50.56	
1992	18.49	16.20	2018	48.84	52.24	
1993	19.34	16.50	2019	50.22	54.01	
1994	20.22	16.80	2020	51.60	55.43	
1995	21.12	17.20	2021	52.98	—	
1996	22.06	18.40	2022	54.35	—	
1997	23.02	19.60	2023	55.72	—	
1998	24.02	20.79	2024	57.08	—	
1999	25.04	21.99	2025	58.42	—	
2000	26.09	23.20	2026	59.76	—	
2001	27.17	24.43	2027	61.08	—	
2002	28.28	25.80	2028	62.39	—	
2003	29.41	27.20	2029	63.67	—	
2004	30.57	28.90	2030	64.94	—	
2005	31.76	30.65				

3.3 城镇化率与碳排放作用机制分析

绘制河南省 1980—2020 年碳排放量与城镇化率散点图,对式(3)进行回归曲线估算,如图 5 所示。二次模型的决定系数  $R^2=0.9738$ ,线性模型的决定系数  $R^2=0.9491$ ,表明二次模型比线性模型的拟合效果更好,更符合河南省碳排放量与城镇化率之间的变化关系。

从图 5 可看出,河南省城镇化率与碳排放量之间呈现倒“U”型关系,表明当河南省城镇化率水平发展到一定程度后,对碳排放量的增长将起到抑制作用。截至 2020 年,河南省尚未跨过环境库兹涅茨曲线的拐点,结

合上文对城镇化发展水平的预测，当城镇化率达到 70% 时，河南省环境库兹涅茨曲线将到达拐点，即 2026 年河南省实现碳排放达峰，随后将进入碳减排阶段。

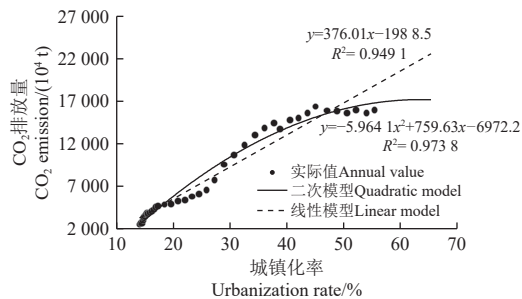


图 5 河南省 1980—2020 年城镇化率与碳排放量拟合曲线  
Fig.5 The fitting curve of urbanization rate and carbon emissions in Henan Province from 1980 to 2020

为揭示城镇化水平在环境方面的影响，利用脱钩模型计算得到河南省 1980—2020 年的弹性脱钩系数（表 7），从而为河南省控制城镇化水平进入碳减排阶段提出可行性建议。

表 7 河南省 1980—2020 年城镇化率与碳排放脱钩系数

Table 7 Decoupling coefficient between urbanization rate and carbon emissions in Henan Province from 1980 to 2020

年份 Year	$\Delta y_t$	$\Delta U_t$	$I_t$	脱钩状态 Decoupling state
1980	0.01	0.01	1.42	增长负脱钩
1981	0.06	0.01	4.50	增长负脱钩
1982	-0.02	0.01	-1.07	强脱钩
1983	0.13	0.01	9.54	增长负脱钩
1984	0.11	0.01	15.85	增长负脱钩
1985	0.03	0.01	4.18	增长负脱钩
1986	0.01	0.01	1.10	增长耦合
1987	0.06	0.01	9.48	增长负脱钩
1988	0.05	0.01	4.14	增长负脱钩
1989	-0.03	0.01	-5.09	强脱钩
1990	0.02	0.01	2.76	增长负脱钩
1991	0.03	0.03	1.23	增长负脱钩
1992	0.04	0.02	2.17	增长负脱钩
1993	0.05	0.02	2.71	增长负脱钩
1994	0.06	0.02	3.32	增长负脱钩
1995	0.04	0.02	1.69	增长负脱钩
1996	0.03	0.07	0.40	弱脱钩
1997	0.01	0.07	0.14	弱脱钩
1998	0.08	0.06	1.31	增长负脱钩
1999	0.02	0.06	0.32	弱脱钩
2000	0.07	0.06	1.33	增长负脱钩
2001	0.06	0.05	1.04	增长耦合
2002	0.08	0.06	1.35	增长负脱钩
2003	0.18	0.05	3.26	增长负脱钩
2004	0.23	0.06	3.74	增长负脱钩
2005	0.12	0.06	1.97	增长负脱钩
2006	0.11	0.06	1.83	增长负脱钩
2007	0.10	0.06	1.75	增长负脱钩
2008	0.06	0.05	1.28	增长负脱钩
2009	0.04	0.05	0.87	增长耦合
2010	-0.05	0.03	-1.60	强脱钩
2011	0.08	0.04	1.78	增长负脱钩
2012	0.02	0.04	0.41	弱脱钩
2013	0.04	0.04	1.10	增长耦合
2014	0.05	0.03	1.41	增长负脱钩
2015	-0.03	0.04	-0.65	强脱钩
2016	0.00	0.04	-0.10	强脱钩
2017	-0.01	0.04	-0.36	强脱钩
2018	0.02	0.03	0.59	弱脱钩
2019	-0.02	0.03	-0.59	强脱钩
2020	0.02	0.03	0.83	增长耦合

从表 7 看出，1980—2020 年期间，脱钩系数表现出较强的阶段性，整体呈现“增长负脱钩向强脱钩转变，间歇性夹杂弱脱钩与增长耦合”的特点。各级主管部门应不断从体制、机制、政策等方面对城镇化发展进行调控与修正。由于碳排放负面效应的完全消解需要缓冲和过渡期，因此，研究期内城镇化发展依然伴随较大规模的资源消耗和碳排放。随着城镇化的高质量发展，河南省碳减排技术和碳汇不断提升，这在脱钩状态的演进过程中也有所体现。2008 年之前，增长负脱钩状态出现频率较高，但 2008 年之后，强脱钩状态逐渐占据主流。2019—2020 年，河南省城镇化与碳排放呈增长耦合态势，即城镇化发展过程中能源消费持续增加。

碳排放是传统城市人口城镇化无法避免的结果，也是城市经济发展内部各类要素不断博弈并实现良性协调、系统优化的必经环节。1980—2020 年，河南省碳排放量由 2 516.20 万 t 增长至 15 998.77 万 t，区域环境面临较大的碳排放压力。但随着“低碳”“绿色”等发展理念的不断深化以及相关政策和技术的推进，区域城市低碳减排的潜力和空间将得到进一步释放。整体来看，城镇化初期，大量人口向城市聚集，使得能源消费量急剧上升，碳排放增加；城镇化后期，技术进步、集聚效应和规模效应提升了能源利用效率，从而促进碳减排。

3.4 “三生”空间与碳排放关系分析

通过分析图 3 可发现，生活空间面积与碳排放总量的变化呈现相同的趋势，而生产空间和生态空间并不具备此特点，根据相关研究<sup>[31-35]</sup>经验，“三生”空间格局的变化对碳排放的影响表现为生活空间扩张导致碳排放总量的增加。本研究对“生活”空间面积与碳排放量进行皮尔逊相关性检验发现，“生活”空间与碳排放量的皮尔逊相关系数为 0.976（ $P<0.01$ ），二者相关性显著。在此前提下，参照式（5）计算“三生”空间面积与碳排放量间脱钩系数，具体结果见图 6。

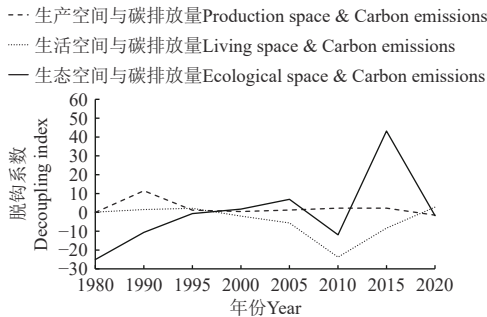


图 6 “三生”空间与碳排放量脱钩系数变化  
Fig.6 Changes in the decoupling coefficient between production-living-ecological space and carbon emissions

从图 6 可以发现，从 1980—2020 年的 40 年间，河南省生活空间面积与碳排放量脱钩系数逐渐减小，脱钩状态以增长负脱钩为主，并向弱脱钩状态转变，这表明生活空间扩张对碳排放增加产生的贡献逐渐减少，生活空间扩张带来的环境压力减小；生产空间减少对碳排放



总量的贡献增加,生产空间带来的碳排放压力相对增加;生态空间的变化对碳排放增加的贡献在 2010 年小幅减小后又 在 2015 年回调,总体基本保持平衡。

## 4 结 论

本研究按照“理论分析-模型构建-实证研究”的逻辑主线,改进生物学 DNA 分子结构,探究城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制,并利用河南省 1980—2020 年面板数据开展分析,得出以下主要结论:

1) 城镇化进程、碳排放与“三生”空间格局交互影响,人口与土地城镇化导致“三生”空间结构失衡,进而影响生态环境,具体表现为城镇化发展水平与碳排放水平严重负脱钩。进入城镇化后期,生产、生活、生态空间适宜程度提升,空间布局趋于协调,城镇化水平与碳排放水平呈适度耦合关系,“人-地-碳”形成最佳发展关系。

2) 河南省城镇化率与碳排放量间存在显著倒“U”型曲线关系,由此预测河南省将于 2026 年出现碳达峰,随后进入碳减排阶段。分阶段对比发现,河南省碳排放与城镇化呈现“增长负脱钩向强脱钩转变,间歇性夹杂弱脱钩与增长耦合”的特点,且城镇化快速发展过程中能源消费依然增加,伴随节能减排工作的持续推进,两者关系将会稳步进入适度耦合区间。

3) 河南省“三生”空间总体呈现生产空间有序减少、生活空间逐步扩张、生态空间稳定发展的趋势。“三生”空间变化与碳排放相关关系表现为生产空间对碳排放的贡献增加,生活空间对碳排放的贡献减小,生态空间对碳排放的基本稳定。未来空间布局优化中,应减缓生活空间扩张,提高生态空间占比增加碳汇,降低生产空间产生的碳排放,促进“三生”空间趋于共生协调。

本研究建立的交互模型中,城镇化率仅代表人口城镇化进程,尚未考虑到土地城镇化、产业城镇化等多要素对碳排放及“三生”空间布局产生的影响。同时,由于基础数据的可获取性,仅使用面积反映“三生”空间的变化不够全面,后续研究中可以引入空间分布因素。另外,后续可通过建立“三生”空间的适宜度评价体系,量化“三生”空间分布优劣程度,以期政府决策提供更详细的行为指南。

## 【参 考 文 献】

- [1] 冯雨雪,李广东.青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析[J].地理学报,2020,75(7): 1386-1405.  
FENG Yuxue, LI Guangdong. Interaction between urbanization and eco-environment in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1386-1405. (in Chinese with English abstract)
- [2] MUSAH M, KONG Y, MENSAH IA, et al. The connection between urbanization and carbon emissions: A panel evidence from West Africa[J]. Environment, Development & Sustainability, 2021, 23(8): 11525-11552.
- [3] 王志强,蒲春玲.中国城镇化碳排放核算体系构建与实证[J].统计与决策,2022,38(7): 57-61.  
WANG Zhiqiang, PU Chunling. Construction and empirical study of China's urbanization carbon emission accounting system[J]. Statistics and Decision, 2022, 38(7): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- [4] 任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J].中国人口·资源与环境,2020,30(4): 95-106.  
REN Xiaosong, LIU Yujia, ZHAO Guohao. The impact and transmission of economic agglomeration on carbon intensity[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(4): 95-106. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王鑫静,程钰.城镇化对碳排放效率的影响机制研究——基于全球 118 个国家面板数据的实证分析[J].世界地理研究,2020,29(3): 503-511.  
WANG Xinjing, CHENG Yu. Research on the influencing mechanism of urbanization on carbon emission efficiency—Based on an empirical study of 118 countries[J]. World Regional Studies, 2020, 29(3): 503-511. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张腾飞,杨俊,盛鹏飞.城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2): 47-57.  
ZHANG Tengfei, YANG Jun, SHENG Pengfei. The impact and channels of urbanization on carbon dioxide emissions in china[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(2): 47-57. (in Chinese with English abstract)
- [7] 黄蕊,王铮,丁冠群,等.基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J].地理研究,2016,35(4): 781-789.  
HUANG Rui, WANG Zheng, DING Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emission from energy consumption in Jiangsu province based on STIRPAT model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 781-789. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陶良虎,李星,张群也.城镇化对碳排放的影响研究——以广东省为例[J].生态经济,2020,36(2): 84-89.  
TAO Lianghu, LI Xing, ZHANG Qunye. Impact of urbanization on carbon dioxide emissions: Taking Guangdong as an example[J]. Ecological Economy, 2020, 36(2): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- [9] GUO X M, FANG C L. How does urbanization affect energy carbon emissions under the background of carbon neutrality?[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116878.

- [10] 毕晓航. 城市化对碳排放的影响机制研究[J]. 上海经济研究, 2015, 325(10): 97-106.
- BI Xiaohang. The impact mechanism of urbanization on carbon emissions[J]. Shanghai Journal of Economics, 2015, 325(10): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2021, 40(12): 1999-2010.
- WANG Rui, ZHANG He, QIANG Wenli, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of china based on urbanization[J]. Progress in Geography, 2021, 40(12): 1999-2010. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王剑, 关士钦, 严维斌, 等. 青海省“三生用地”时空演化特征及其碳排放效应[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 212-218.
- WANG Jian, GUAN Shiqin, YAN Weibin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and carbon emission effects of “three-generation land” in Qinghai Province[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(4): 212-218. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杜金霜, 付晶莹, 郝蒙蒙. 基于生态网络效用的昭通市“三生空间”碳代谢分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1208-1223.
- DU Jinshuang, FU Jingying, HAO Mengmeng. Analyzing the carbon metabolism of "Production-Living-Ecological" space based on ecological network utility of in Zhaotong[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1208-1223. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林刚, 江东, 付晶莹, 等. “三生”空间格局演化“碳流”分析—以唐山市为例[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 107-114.
- LIN Gang, JIANG Dong, FU Jingying, et al. Carbon flow analysis for production-living-ecological space: A case study of Tangshan, China[J]. Science and Technology Review, 2020, 38(11): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐磊, 董捷, 李璐, 等. 基于功能分区视角的长江中游城市群国土空间特征及优化[J]. 经济地理, 2017, 37(6): 76-83.
- XU Lei, DONG Jie, LI Lu, et al. Characteristics and optimization of geographical space in urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River based on functional zoning[J]. Economic Geography, 2017, 37(6): 76-83. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李明薇, 鄢雨早, 陈伟强, 等. 河南省“三生空间”分类与时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(9): 13-20.
- LI Mingwei, YUN Yuhan, CHEN Weiqiang, et al. Classification and spatial-temporal analysis of "Production-Living- Ecological" space in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(9): 13-20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李慧燕. “三生”空间理念下京津冀城市群新型城镇化协调发展研究[J]. 生态经济, 2021, 37(5): 92-98.
- LI Huiyan. Research on new urbanization coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei City Cluster based on the concept of "product-living-ecology" space[J]. Ecological Economy, 2021, 37(5): 92-98. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李效顺, 刘希朝, 和伟康, 等. 基于 DNA 模型的城镇人地耦合框架及机理研究[J]. 现代城市研究, 2023 (4): 126-132.
- LI Xiaoshun, LIU Xizhao, HE Weikang, et al. Human-earth coupling mechanism and framework of urban development based on DNA model[J]. Modern urban research, 2023(4): 126-132. (in Chinese with English abstract)
- [19] 阎慧臻. Logistic 模型在人口预测中的应用[J]. 大连工业大学学报, 2008, 27(4): 333-335.
- YAN Huizhen. Application of logistic model in population prediction[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2008, 27(4): 333-335. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王学保, 蔡果兰. Logistic 模型的参数估计及人口预测[J]. 北京工商大学学报, 2009, 27(6): 75-78.
- WANG Xuebao, CAI Guolan. Parameter evaluation of Logistic model and population prediction[J]. Journal of Beijing Technology and Business University, 2009, 27(6): 75-78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈彦光. 人口与资源预测中 Logistic 模型承载量参数的自回归估计[J]. 自然资源学报, 2009, 24(6): 1105-1114.
- CHEN Yanguang. Carrying capacity estimation of Logistic model in population and resource prediction by nonlinear autoregression[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(6): 1105-1114. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈彦光, 余斌. 人口增长的常用数学模型及其预测方法——兼谈对 Keyfitz 双曲增长等模型的修正与发展[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, 40(3): 452-456.
- CHEN Yanguang, YU Bin. Three models for prediction population growth -theoretical foundation application methods and revised expressions[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2006, 40(3): 452-456. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张乐勤, 陈发奎. 基于 Logistic 模型的中国城镇化演进对耕地影响前景预测及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 1-11.
- ZHANG Leqin, CHEN Fakui. Analysis and forecast on



- prospect about influence of urbanization gradual progress on cultivated land in China based on logistic model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(4): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姚远, 李效顺, 曲福田, 等. 中国经济增长与耕地资源变化计量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 209-214.  
YAO Yuan, LI Xiaoshun, QU Futian, et al. Quantitative analysis of relationship between economy growth and cultivated land change in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(14): 209-214. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李效顺, 曲福田, 陈友偲, 等. 经济发展与城市蔓延的 Logistic 曲线假说及其验证——基于华东地区典型城市的考察[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 713-722.  
LI Xiaoshun, QU Futian, CHEN Youcai, et al. Hypothesis and validation on the logistic curve of economic development and urban sprawl: Based on the investigation of the typical cities in East China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(5): 713-722. (in Chinese with English abstract)
- [26] 廉勇. 经济层次与环境污染: 基于碳排放的环境库兹涅茨曲线研究[J]. 统计与决策, 2021, 37(20): 146-150.  
LIAN Yong. Economic hierarchy and environmental pollution: Environmental Kuznets curve based on carbon emission[J]. *Statistics and Decision*, 2021, 37(20): 146-150. .
- [27] 白一飞, 张伟荣, 刘加平, 等. 基于环境库兹涅茨曲线的城市示范区域人均碳排放量预测方法研究[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 35-42,84.  
BAI Yifei, ZHANG Weirong, LIU Jiaping, et al. Study on forecasting method of per capita carbon emissions in urban demonstration area based on environmental kuznets curve[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(4): 35-42,84. (in Chinese with English abstract)
- [28] 闫明涛, 马玉玲, 乔家君. 河南省农业经济增长与农业面源污染关系的探讨——基于 EKC 理论的实证分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 12-19.  
YAN Mingtao, MA Yuling, QIAO Jiajun. Discussion on the relationship between agricultural economic growth and agricultural non-point source pollution in Henan Province: Empirical analysis based on EKC theory[J]. *Journal of Henan University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1): 12-19. .
- [29] 王建军, 吴志强. 城镇化发展阶段划分[J]. 地理学报, 2009, 64(2): 177-188.  
WANG Jianjun, WU Zhiqiang. Delimiting the stages of urbanization growth progress: A method based on Northam's theory and logistic growth model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(2): 177-188. (in Chinese with English abstract)
- [30] HUANG W, LI J X. The Coupling Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions From Land Use in Ningxia[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 927798.
- [31] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304.  
LIU Jilai, LIU Yansui, LI Yurui. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1290-1304. .
- [32] 张永蕾, 栾乔林, 熊昌盛, 等. 基于多源空间数据的“三生”空间异质性评价与分区划定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 214-223,317.  
ZHANG Yonglei, LUAN Qiaolin, XIONG Changsheng, et al. Spatial heterogeneity evaluation and zoning of production-living-ecological space based on multi-source spatial data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 214-223, 317. (in Chinese with English abstract)
- [33] 郭莉, 白丽芳, 王超越, 等. 基于“三生空间”的重庆市碳排放增长机理及趋势预测[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 816-823.  
GUO Li, BAI Lifang, WANG Chaofei, et al. Growth mechanism and trend prediction of carbon emission in Chongqing based on product-living-ecological space[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2022, 44(6): 816-823. (in Chinese with English abstract)
- [34] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(11): 101-111.  
CHEN Meijing, WANG Qingri, BAI Zhongke, et al. Transition of "production-living-ecological" space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: A case study of Guizhou Province[J]. *China Land Science*, 2021, 35(11): 101-111. (in Chinese with English abstract)
- [35] 冯新惠, 李艳, 余迹, 等. 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度时空格局及协调发展特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 208-218.  
FENG Xinhui, LI Yan, YU Er, et al. Spatiotemporal pattern and coordinating development characteristics of carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(3): 208-218. (in Chinese with English abstract)

## Analysis of the interaction mechanism of urbanization, carbon emissions, and production-living-ecological space in Henan Province of China

LI Xiaoshun<sup>1,2</sup>, LI Zhixin<sup>2</sup>, XIE Xiaotong<sup>1,3\*</sup>, LIU Xizhao<sup>1,2</sup>, CHEN Jiangquan<sup>1,2</sup>, LI Yifei<sup>1,2</sup>

(1. Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Public Administration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Carbon emissions in the process of urbanization are usually analyzed using industry, population, and economic factors. It is a high demand to consider the coupling space-time change of "human-land-carbon". In addition, the land can also serve as an important factor of production, leading to great impacts on carbon emissions. This study aims to explore the interaction mechanism among urbanization, carbon emission, and the "production-living-ecological" space. The spatial structure of the DNA model was first selected. The three-level structure was then taken as the theoretical basis. The spatial coupling model of urbanization, carbon emission, and "production-living-ecological" space was finally established using the environmental Kuznets curve and Logistic equation. The mechanism of interaction was also proposed similar to the molecular structure of DNA. Taking Henan Province of China as an example, the regression analysis was carried out to construct the curve of urbanization rate, carbon emission, and the curve of "production-living-ecological" spatial area change during 1980-2020. The Tapio decoupling coefficient and correlation test were used to analyze the quantitative relationship and correlation degree between carbon emission and the space area of "production-living-ecological". The quantitative relationship was verified for the environmental Kuznets curve between urbanization and carbon emission. The mechanism of action was also achieved among them. The results showed that: 1) Population and land urbanization induced the imbalance of ecological, production, and living space structure, leading to the quality of the ecological environment. There was a serious negative decoupling between urbanization development and carbon emission level. The spatial layout was coordinated to gradually shift from the serious negative to moderate coupling, particularly with the advancement of urbanization upgrading, production, life, and ecological space in the further suitable integration. The optimal coupling relationship can be expected for the "man, earth, and carbon". 2) The empirical results showed that there was a significant inverse U-shaped curve relationship between urbanization rate and carbon emissions. The decoupling state showed a strong stage, indicating the overall characteristics of "negative growth decoupling to strong decoupling, intermittent weak decoupling, and growth coupling". The carbon peak was predicted in 2026 and then entered the stage of carbon emission reduction. 3) The comprehensive analysis showed that the "production-living-ecological" space shared a trend of the orderly reduction of production space, steady expansion of living space, and stable development of ecological space. The correlation analysis showed that the contribution rate of production space to carbon emission increased, whereas, the contribution of living space to carbon emission decreased, and there was a stable contribution of ecological space to carbon emission. Therefore, the space layout should slow down the expansion of living space, and then increase the proportion of ecological space and carbon sink, finally reducing the carbon emissions generated by production space. The finding can provide quantitative reference and decision-making on regional urbanization and dual-carbon strategy.

**Keywords:** land use; function; ecology; urbanization; carbon emissions; production-living-ecological space; DNA models; Henan Province