

# 资源型城市转型背景下土地利用结构的模拟与预测

於冉<sup>1</sup>, 魏露<sup>1</sup>, 叶芸<sup>2</sup>, 储昭君<sup>1</sup>, 於忠祥<sup>1</sup>

(1.安徽农业大学 经济管理学院, 安徽 合肥 230036; 2.南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** [目的] 资源型城市作为国家资源能源安全的重要保障城市,其转型发展方式更应向高质量方向推进。研究资源型城市转型背景下土地利用结构的变化并进行预测模拟,为新时期资源型城市国土空间优化提供新思路。[方法] 基于资源型城市转型发展的概念及内涵,分析经济、社会、人口、科技、资源环境5个维度的系统性影响,并与空间布局相关联,构建系统动力学模型,以安徽省铜陵市2005—2020年的历史数据为参照,将2021—2035年的数据设置仿真情境,进行土地利用结构的多情境趋势性预测分析。[结果] ①铜陵市土地利用和经济发展现状奠定了发展的基础,可以此为依据进行转型条件设置和土地利用结构变化的合理预测。②资源型城市转型发展作为一个系统性概念,形成“系统—指标—要素”的层级框架,不仅相互关联,密不可分,还传导作用于不同的地类,影响土地利用系统。③铜陵市2021—2035年地类的情境趋势发展差异较为相似,即耕地、林地、水域、草地和未利用地的减少幅度自经济发展、社会进步、综合发展而递减,在资源保护情境下面积均有小幅度提升。建设用地则相反,增加幅度随经济发展、社会进步、综合发展而递减,在资环保护情境下扩张速度得到一定程度的控制。[结论] 资源型城市的新时期转型,不仅要将在内要素融合成系统性概念,还要提升土地利用系统的关注度,重视结构合理性和发展协调性。

**关键词:** 资源型城市; 转型发展; 系统动力学模型; 土地利用结构; 安徽省铜陵市

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2024)03-0113-11

**中图分类号:** F299.27, F293.2

**文献参数:** 於冉, 魏露, 叶芸, 等.资源型城市转型背景下土地利用结构的模拟与预测[J].水土保持通报, 2024, 44(3):113-123.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.013; Yu Ran, Wei Lu, Ye Yun, et al. Simulation and prediction of land use structure in context of transformation of resource-based cities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3):113-123.

## Simulation and Prediction of Land Use Structure in Context of Transformation of Resource-based Cities

Yu Ran<sup>1</sup>, Wei Lu<sup>1</sup>, Ye Yun<sup>2</sup>, Chu Zhaojun<sup>1</sup>, Yu Zhongxiang<sup>1</sup>

(1.School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036,

China; 2.School of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** [Objective] Resource-based cities are important guaranteed cities for national resource and energy security. Their transformation and development mode should be promoted in the direction of high quality. The change of land use structure under the background of transformation of resource-based cities was studied and the prediction and simulation were carried out to provide new ideas for the territorial space optimization of resource-based cities in the new era. [Methods] Based on the concept and connotation of the transformation and development of resource-based cities, the systematic impacts of five dimensions of economy, society, population, science and technology, resources and environment are analyzed, and correlated with spatial layout, a system dynamics model was built. Historical data for Tongling City, Anhui Province from 2005 to 2020 was used as a reference, and datasets from 2021 to 2035 were used in a simulation scenario to carry out a multi-contextual land use structure trend prediction analysis. [Results]

收稿日期:2023-11-14

修回日期:2023-12-15

资助项目:安徽省教育厅人文社会科学重点项目“乡村振兴背景下产城融合评价及区域差异研究:以安徽16省个地级市为例”(SK2019A0130)

第一作者:於冉(1984—),男(汉族),安徽省巢湖市人,博士,副教授,主要从事土地利用碳排放研究。Email:yuran@ahau.edu.cn。

通信作者:叶芸(1998—),女(汉族),安徽省铜陵市人,博士研究生,研究方向为土地资源管理与政策。Email:2954411490@qq.com。

① The current situation of land use and economic development in Tongling City laid the foundation for development that was used as the basis of setting the conditions for transformation and reasonable prediction of changes in land use structure. ② As a systemic concept, the transformational development of resource cities has formed a hierarchical framework of “system-indicator-element”, which is not only interrelated and inextricably linked, but also transmits its effects on different land types and influences the land-use system. ③ Differences in the development of land use trends between 2021 and 2035 in Tongling City were similar, i. e., the decrease of arable land, forest land, water area, grassland, and unused land decreased from economic development, social progress, and comprehensive development, and the area increased slightly under the scenario of resource and environmental protection. In contrast, the increase rate of construction land decreased with economic development, social progress and comprehensive development, and the expansion rate was controlled to a certain extent under the scenario of resource and environmental protection. [Conclusion] The new-era transformation of resource-based cities should not only integrate the intrinsic elements into a systematic concept but also enhance the attention of the land-use system and emphasize structural rationality and development coordination.

**Keywords:** resource-based city; transformation and development; system dynamics model; land use structure; Tongling City, Anhui Province

18 世纪 60 年代工业革命以来,世界范围兴起了众多以资源采掘和开发为主的城市和地区。特别是 20 世纪 20 年代后,大规模的工业生产和城市化推进经济发展,各地对煤炭、矿产、石油等资源的需求量上升,资源型城市和地区也得到进一步发展<sup>[1]</sup>。对资源型城市的开创性研究始于加拿大学者 Innis 的专著 *An Introduction to Canadian Economic History*<sup>[2]</sup>,而后关注点延伸至经济增长、对外贸易、产业结构、劳动力市场、社区发展等方面<sup>[3-5]</sup>,并融合制度经济学、环境经济学、发展社会学等学科理论<sup>[6-8]</sup>,加强了对自然环境、文化保护、女性权力维护、区域空间结构、政府干预等要素视角的探索<sup>[9-13]</sup>。相较于西方发达国家,中国具有一定的发展滞后性但一直将资源型城市的转型发展放在重要地位。1978 年改革开放战略推动国家逐渐从计划经济向市场经济转变,各资源型城市以经济增长为导向,掠夺性地开采资源,造成了众多城市问题,例如产业结构失衡、经济增长减缓、失业率提升、生态环境恶化等<sup>[14-17]</sup>。21 世纪后,国家进入新发展阶段,不再一味追求经济发展速度,生态环境保护、人与自然协调共生机制、众学科融合发展等理念提升至新高度。国内学者关于资源型城市的研究视角逐渐扩展至城市发展策略<sup>[18]</sup>、转型发展能力<sup>[19]</sup>、产业空间形态<sup>[20]</sup>、生态环境等方面<sup>[21]</sup>。

资源型城市的转型发展往往是通过众多系统要素共同作用来实现的,系统动力学模型(system dynamic model, SD 模型)可以将区域内经济、社会、环境等部分构建成复合系统,从宏观视角出发分析系统的整体发展方向与演化趋势,揭示复杂问题的本质和产生机理,从而实现资源型城市综合性、全面性的

转型发展分析<sup>[22]</sup>。当前研究中,视角多集中在低碳转型机理与调控对策研究<sup>[23]</sup>、经济转型研究<sup>[24]</sup>、发展路径研究<sup>[25]</sup>、科技产业的协同发展研究<sup>[26]</sup>等方面,鲜少从系统关联性视角出发,进行多系统、多要素结合的研究,也鲜少进行未来发展情境的预测性分析。与此同时,资源型城市的转型发展进程会影响土地利用,众多学者从社会经济特征及资源开发状况评价资源型城市土地集约水平<sup>[27]</sup>,从生态足迹和生态承载力关系和土地利用覆盖变化两方面进行城市系统健康性评价<sup>[28]</sup>,从区域差异性角度出发进行土地利用效率研究<sup>[29]</sup>,模拟多情境下资源型城市的生态服务功能价值量的变化对碳储量的影响<sup>[30]</sup>。但缺少关于资源型城市系统性转型发展与土地利用结构变化的趋势预测性研究。鉴于此,本文综合考虑经济、社会、人口、科技、资源环境的多系统,同时设置自然趋势、经济发展、社会进步、资环保护和协调发展的 5 种情境,共同构建转型发展背景下的多系统多情境的土地利用结构优化方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

安徽省铜陵市下辖铜官区、义安区、郊区 3 个区及枞阳县(图 1)。自然环境方面,境内南部低山、丘陵纵横交结,长江穿市而过,水网密度高,河沟纵横,湖沼广布。社会经济方面,截至 2021 年末,常住人口  $1.31 \times 10^6$  人,城镇化率为 66.3%,地区生产总值  $1.17 \times 10^{11}$  元,三产结构为 5.1 : 49.5 : 45.4。2019 年,《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》将铜陵市划为长江三角洲中心区城市,体现出新时代的发展机遇。

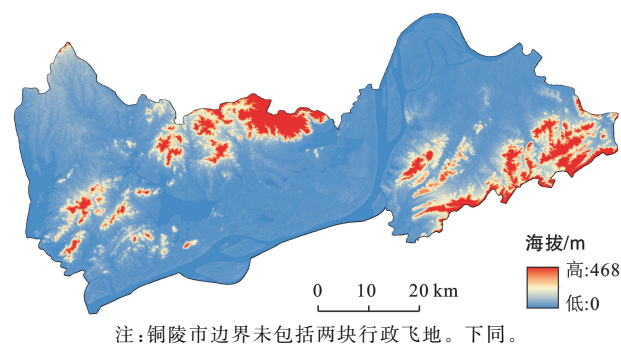


图 1 安徽省铜陵市地形图

Fig.1 Geographic map of Tongling City, Anhui Province

1.2 数据来源与处理

本文所需数据主要有土地利用/地表覆被数据、系统动力学要素的社会经济统计数据,获取方法、相关信息、处理方法如下。

(1) 土地利用/地表覆被数据。运用武汉大学 CLCD 中国年度土地覆盖数据集(30 m×30 m)采集的数据,并集合《土地利用现状分类》(GB/T 21010—

2017),将 CLCD 数据的 9 类用地,筛选为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等 6 类土地为研究对象。需要说明的是,铜陵市因历史原因在安庆市和池州市有两块行政飞地,但由于缺少数据资料,将不作为本文的研究范围。

(2) 社会经济统计数据。文中的经济社会数据来自于中国城市统计年鉴、铜陵市统计年鉴、铜陵市政府工作报告、安庆市统计年鉴、安庆市政府工作报告等相关资料。经过指标选择、指标数据的统计及处理得出后文所需的社会经济指标数据。

2 铜陵市发展现状分析

2.1 铜陵市土地利用动态分析

基于 2005 年,2010 年,2015 年和 2020 年 4 期土地利用数据,对铜陵市用地结构进行统计,得到用地结构表(表 1),再通过 GIS 平台,将 4 期土地利用布局进行可视化表达(图 2)。

表 1 铜陵市 2005—2020 年土地利用类型面积及其比例  
Table 1 Area and proportion of land use types in Tongling City from 2005 to 2020

土地利用 类 型	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
耕 地	1 852.39	62.51	1 813.35	61.19	1 793.81	60.53	1 785.77	60.26
林 地	575.595	19.42	591.509	19.96	565.367	19.08	576.274	19.45
草 地	0.343	0.012	0.495	0.017	0.162	0.005	0.074	0.003
水 域	399.809	13.49	386.671	13.05	404.153	13.64	385.105	12.99
建设用地	135.346	4.57	171.468	5.79	199.977	6.75	216.292	7.29
未利用地	0.032	0.001 1	0.010	0.000 3	0.010	0.000 3	0.000 616	0.000 021

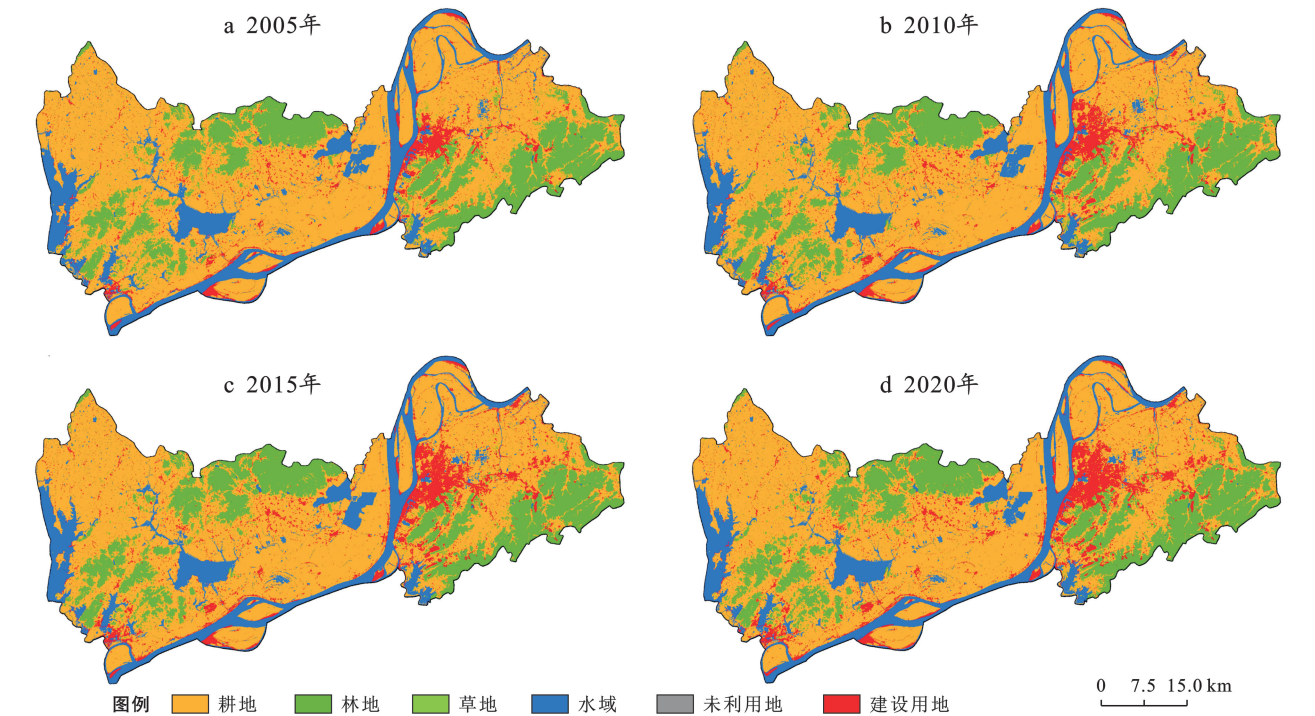


图 2 2005—2020 年铜陵市土地利用类型分布  
Fig.2 Distribution of land use types in Tongling City from 2005 to 2020



整体来看,2005—2020年,耕地面积减少66.62 km<sup>2</sup>,所占比例减少2.25%;水域面积减少14.704 km<sup>2</sup>,所占比例减少0.5%;建设用地面积增加80.946 km<sup>2</sup>,所占比例增加2.72%;林地、草地、未利用地整体变化较小,其中林地面积增加0.679 km<sup>2</sup>,所占比例增加0.03%;草地面积减少0.268 km<sup>2</sup>,所占比例减少0.009%;未利用地面积减少0.031 6 km<sup>2</sup>,比例减少0.001 1%。从每5年各地类的变动率来看,耕地每一个时期的降低率不断减缓,从-2.11%提升至-0.45%;林地呈现先升后降再升的波浪形趋势,草地为先升后降的倒U型趋势,而水域和未利用地则为先降后升再降的变化趋势;建设用地一直保持增长,但增长速度也由26.69%降至8.16%。耕地面积最大、布局最广,林地主要分布于长江西北部和东南部,水域除长江水系之外,西部有三大片湖泊分布,建设用地主要集中在沿江东边区域,且有向北向东扩展的变化。

## 2.2 铜陵市转型发展SWOT分析

(1) 优势(strengths)分析。铜陵市地处长江铜铁成矿带,内生成矿条件有利,以有色金属铜矿著称,是全国八大有色金属工业基地之一,拥有得天独厚的资源优势。截至2020年,发现铁、铜、金、银、硫铁矿和水泥用石灰岩等32种矿产,各类矿种矿产地204处,累计查明铜金属量 $5.71 \times 10^6$  t,保有铜金属量 $3.16 \times 10^6$  t。并且自然风光优美,具有悠久铜采掘历史,对外交通十分便利。在新中国成立的计划经济时期、市场经济转型期等众多国家发展历史节点,“铜陵有色”为铜陵市资源型产业的长足发展,为城市后期发展奠定了坚实的工业基础和社会经济基础。一方面,依托矿产资源勘探、采掘、加工等工业产业推动了人口集聚和人口迁移,另一方面,作为保障性产业的农业也得到生产力的提升。与此同时,为了满足产业发展和人员生产生活,城市基础设施、公共服务设施应运而生,为铜陵市后期社会设施建立完善奠定基础。

(2) 劣势(weaknesses)分析。铜陵市从资源型城市向资源枯竭型城市转变的过程中,最主要的表现即为资源开采量已逐渐逼近资源探储量的上限,日益无法满足原发展路径下所需的资源量。2006年以来,铜陵市的铜产量逐年下降,铜矿资源自给率不到5%,铜矿资源接近枯竭。与此同时,产业结构以第二产业为主,2001—2020年,第二产业占总产值50%以上,于2010年逼近60%,经济发展过度依赖工业,产业结构较为失衡。在当前数字经济、服务业、金融业蓬勃发展的历史时期,铜陵市仍受困于工业发展的惯性路径,还未形成完善的产业链体系,并不有利于后期经济、产业、社会转型和城市可持续发展。并且,铜

陵市在矿产资源的开采和加工过程中,不仅对生态环境造成了一定程度的破坏,还产生了大量的水污染、空气污染、固体废弃物污染等,对城市环境和居民生活造成了长期的恶劣影响。

(3) 机遇(opportunities)分析。自2005年开始,中央针对资源型城市后续发展提出指导性意见,给予了铜陵市新阶段的发展思路。铜陵市政府也针对城市转型发展提出了众多构想,有力地引导和刺激企业实施技术改造和创新,推动铜加工业结构不断优化升级。党的“二十大”报告指出要促进区域协调发展,深入实施区域协调发展战略、区域重大战略、主体功能区战略、新型城镇化战略,优化重大生产力布局,构建优势互补、高质量发展的区域经济布局和国土空间体系,为新时期资源型城市发展做出时代指引。与此同时,2016年,国务院通过《长江三角洲城市群发展规划(2016—2020年)》,2019年,国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,将铜陵市融入长江三角洲(以下简称“长三角”)区域发展战略,为铜陵市提供了协同发展的机遇。

(4) 挑战(threats)分析。综上所述,铜陵市在新时期进行转型发展,具备资源储备、文化风景、交通便利、发展基础的优势,存在资源枯竭、产业结构失衡、环境污染严重、社会问题突出的劣势,拥有中央文件指导、地方政策支撑、区域发展带动的众多机遇,面临核心工艺不牢、政府监管薄弱、科研人才欠缺、生态建设进程缓慢的众多挑战。但是,仍然要坚持“抓住铜、延伸铜、不唯铜、超越铜”发展思路,打造铜文化基地,拓展铜文化旅游,促进文旅融合;抓住地上地下发展空间,提升资源利用效率;改善生态环境,进行生态修复,加大污染治理力度,积极努力寻求新时期的城市转型之路。

## 2.3 系统动力学模型构建

2.3.1 模型构建 系统动力学模型是用来分析信息反馈系统,研究内部动态结构与反馈机制的模型。自20世纪50年代提出以来,广泛应用于众多领域。其建模过程主要由明确建模目标、确定系统边界、构建因果关系、构建模型、模型检验与修正、模拟结果分析构成。本文所确定的系统空间边界是铜陵市市域(不包括两块行政飞地),系统时间边界是2005—2020年,时间步长设置为1 a,模型检验的历史数据时间段为2005—2020年,预测年份为2021—2035年。

本文构建的资源型城市转型背景下的土地利用系统动力学模型,旨在针对资源型城市的具象指标和城市转型发展的重要指标,研究不同发展情境下的土地利用变化。为探索各子系统间的相互影响,结合经



济、社会、人口、科技和资源环境 5 个方面的与各类用地之间的关系(图 3)。基于子系统构建,并使用 Vensim 软件,绘制资源型城市转型背景下的土地利用结构系统动力学流程图(图 4)。

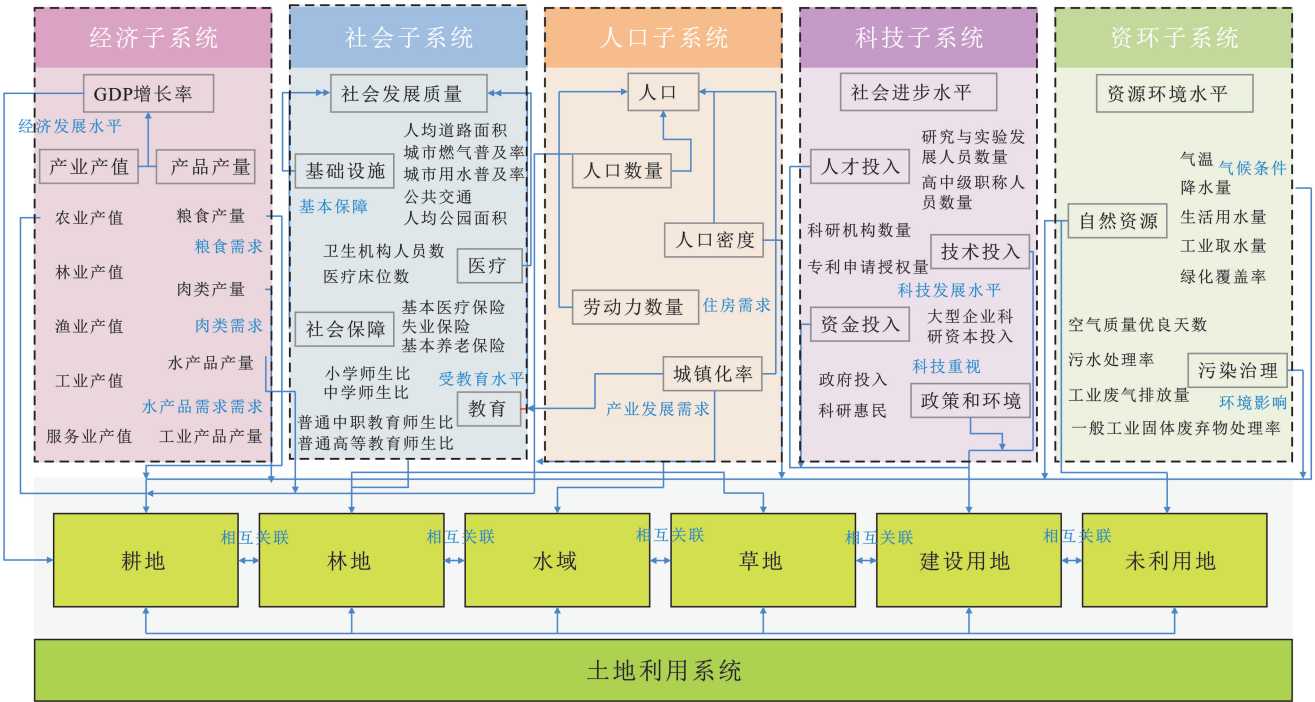


图 3 基于土地利用的资源型城市转型 SD 模型结构图

Fig.3 SD model structure diagram of resource-based cities transformation based on land use

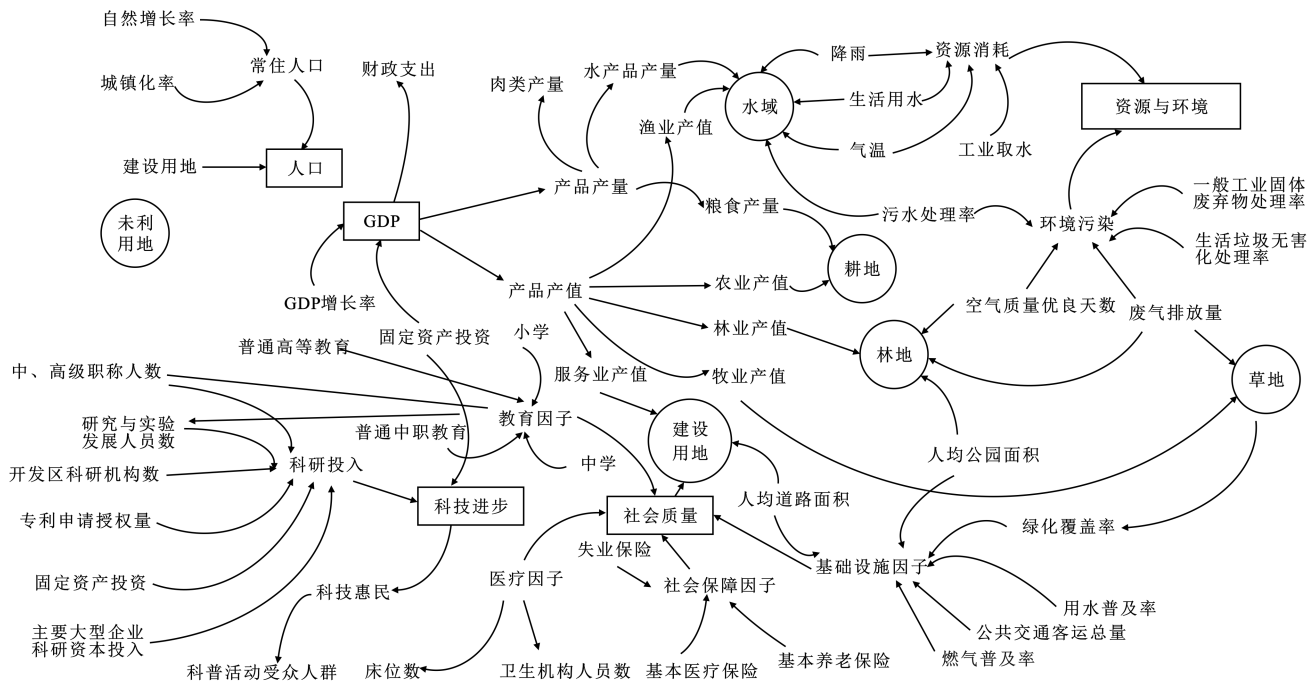


图 4 基于土地利用的资源型城市转型 SD 模型流程图

Fig.4 SD model flow chart of resource-based cities transformation based on land use

(1) 经济子系统。经济发展水平的提高会促进人口流动和社会的进步发展,会提升财政支出的数量和比率,从而能影响其他子系统。选取 GDP 为经济

子系统状态变量,其对应的流率变量为 GDP 增长变化量,由 GDP 增长率(GGR)决定。产业产值是土地利用不同地类的重要经济效益表现,由农业产值

(AIO)、林业产值(FIO)、牧业产值(PIO)、渔业产值(FIO)、服务业产值(SIO)构成。产品产量作为土地利用不同地类的重要经济产出表现,由粮食产量(FPO)、肉类产品产量(MO)、水产品产量(FO)、工业产品产量(IPO)构成,同时还设置了财政支出(FE)、固定资产投资(FAI)等要素。

(2) 社会子系统。作为城市发展不可或缺的社会视角,社会子系统起重要的桥梁关联作用。本文依照民生问题和城市发展的重点关注领域,设置医疗因子(MF)、基础设施因子(IF)、社会保障因子(SSF)和教育因子(EF)4个方面来考量社会质量(SQ)。其中,医疗因子包括卫生机构人员数(NHFP)、医疗床位数(NMB);基础设施因子从生活必需能源保障、交通出行便利性和人居环境的角度构建,包括人均道路面积(RAPC)、城市燃气普及率(CGPR)、城市用水普及率(CWPR)、公共交通客运总量(TPRP)、人均公园面积(PAP);社会保障因子用影响民生的保险保障来表征,包括基本医疗保险(NBMIP)、失业保险(NUIP)、基本养老保险(MBPIP);教育因子考虑到年龄层和教育水平差异,设置小学(ESTR)、中学(SSTR)、普通中职教育(GSETR)、普通高等教育的师生比(GHETR)。

(3) 人口子系统。人作为经济社会发展的主体,是整个城市发展体系的助推者,人类的日常活动直接或间接地与经济、社会、资源环境、科技进步等子系统息息相关。人口主要作用于城市发展的建设用地和农村占比较大的耕地等不同的用地类型,因此选择城市人口(UP)和农村人口(RP)来表征空间区域的人口,城镇化率(UR)、人口密度(PD)的高低会直接影响资源消耗的程度、教育、医疗、基础设施等的配置数量及密度,也会影响区域的劳动力(LN)配置,因此同样作为人口子系统的重要因素。

(4) 科技子系统。资源型城市想要实现新经济时代的转型发展,科技发展水平是关键。科技进步(SPF)需要科研投入(SRI)的增加,科技成果转化则会间接影响经济发展。本文将开发区科研机构数量(DRI)、专利申请授权量(NPAG)、研究与试验发展人员数量(REDs)、中高级职称人员数量(NMSP)、大型企业科研资本投入(LCRI)作为科研投入的重要因子。与此同时,科技进步不仅会推动经济的发展,也会间接作用于社会的进步,例如受教育水平提升、社会便利度提升等惠民作用,该特征用科普活动受众人数(NASP)来表征。

(5) 资源环境子系统。自然资源是维持人类社会活动的重要物质基础,而资源型城市因其独特的发

展条件对资源的依赖性会更高。人类社会经历了从主动适应自然环境,到掠夺资源的发展经济社会的阶段,短期迅速提升经济产出的同时造成了生态环境的破坏和大规模的环境污染。当前提出可持续发展的理念,特别是针对资源型城市,要逐步走向转型之路,其中的重要一环即为提升资源的利用率和修复、保护生态环境,治理污染。因此,本文将资源环境子系统设置为自然资源因子(NRF)和污染治理因子(PCF),分别由气温(T)、降水量(P)、生活用水量(DWC)、工业取水量(IWW)、绿化覆盖率(GC),以及空气质量优良天数(DGAQ)、生活垃圾无害化处理率(HDRDW)、污水处理率(STR)、工业废气排放量(IWGE)、一般工业固体废弃物处理率(ISWDR)构成。

2.3.2 模型参数确定及数学方程 为进一步探究综合系统关系,通过确定模型参数,提取数据中的参数值,构建变量之间的数学方程式,进一步描述模型变量间的关系。各子系统的状态变量初始数据年份为2005年,流率变量和辅助变量数据年份为2005—2020年。根据上述模型参数,并运用线性回归法、表函数法、算术平均法、灰色预测法等方法,得出基于土地利用的资源型城市转型SD模型数学方程(表2)。

2.3.3 仿真情境设置 系统动力学模型可以根据不同因素的取值变化及组合构成不同的模拟情境。本文参考《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》《安徽省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《铜陵市国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《铜陵市土地利用总体规划(2006—2020年)》等相关文件中针对城市发展和资源型城市转型问题提出的控制要求和指标范围,在上文指标综合构建的基础上,选取GDP增长率、城市化率、社会因子、自然因子、污染治理因子和科技进步因子6项指标,通过对不同指标的状态组合,设置自然趋势、经济发展、社会进步、资源保护和协调发展5种情境进行资源型城市土地利用仿真模拟(表3)。

2.3.4 仿真情境设置 系统动力学模型可以根据不同因素的取值变化及组合构成不同的模拟情境。本文参考《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》《安徽省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《铜陵市国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《铜陵市土地利用总体规划(2006—2020年)》等相关文件中针对城市发展和资源型城市转型问题提出的控制要求和指标范围,在上文指标综合构建的基础上,选取GDP增长率、城市化率、社会因子、自然因

子、污染治理因子和科技进步因子 6 项指标,通过对不同指标的状态组合,设置自然趋势、经济发展、社会进步、资源保护和协调发展 5 种情境进行资源型城市土地利用仿真模拟(表 3)。

表 2 基于土地利用的资源型城市转型 SD 模型数学方程  
Table 2 Mathematical equations of SD model of resource-based city transformation based on land use

系 统	SD 模型数学方程	编 号
经济子系统	$FIO=0.016\ 7 * GDP+5.822\ 1$	(1)
	$PIO=0.011\ 2 * GDP+6.976\ 9$	(2)
	$FIO=0.007\ 9 * GDP-0.223\ 9$	(3)
	$AIO=0.026\ 4 * GDP+11.691$	(4)
	$SIO=0.002 * GDP+1.221$	(5)
	$FO=658.881 * FIO-27.497 * TP+110.824 * CA+49\ 468.174$	(6)
	$MO=2\ 269.330 * PIO-23.783 * TP+20\ 588.244 * GL+18\ 306.401$	(7)
	$FPO=1\ 403.295 * AIO+238.483 * TP-786.932 * CL+18\ 800\ 031.407$	(8)
	$IPO=2\ 543.123 * IO+25.123 * TP+56.345 * IL+109.246$	(9)
社会子系统	$SQ=(MF^2+IF^2+SSF^2+EF^2)^{1/4}$	(10)
	$MF=(NMB^2+NHFP^2)^{1/2}$	(11)
	$IF=(RAPC^2+CGPR^2+CWPR^2+TPRP^2+PAP^2)^{1/5}$	(12)
	$SSF=(NBMIP^2+NUIP^2+MBPIP^2)^{1/3}$	(13)
人口子系统	$EF=(GHETR^2+GSETR^2+SSTR^2+ESTR^2)^{1/4}$	(14)
	$TP=UP+RP$	(15)
	$PD=TP/LA$	(16)
科技子系统	$SRI=(REDS^2+NMSP^2+DRI^2+NPAG^2+LCRI^2)^{1/5}$	(17)
资源环境子系统	$RE=(NRF^2+PCF^2)^{1/2}$	(18)
	$NRF=(GC^2+IWW^2+DWC^2+T^2+P^2)^{1/5}$	(19)
	$PCF=(DGAQ^2+HDRDW^2+STR^2+IWGE^2+ISWDR^2+IWGE^2+DGAQ^2)^{1/7}$	(20)
土地利用系统	$TL=2\ 964$	(21)
	$CL=-0.006 * P-0.429 * GGR+0.973 * AIO-8.831 * TP-8.986\ e-05 * FPO-0.531 * UR-0.71 * IL+3497.18$	(22)
	$FL=-0.079 * P+0.529 * GGR-1.958 * FIO+8.599 * TP+0.459 * UR-49.74 * SF-104.408 * NRF+13.847 * SPF+73.544 * GL+1.802 * IL-1.148 * DGAQ+0.005 * IWGE-23.368 * T+82.88$	(23)
	$WA=-0.181 * FL+41.954 * GL+-1.924 * UR-0.007 * P+5.095 * FIO+9.786\ e-06 * FO-6.273 * TP+23.28 * SF-1.572 * SPF+0.812 * STR+44.99 * NRF+0.018 * UR+1\ 400.27$	(24)
	$GL=(0.013 * IL+0.001 * P-0.09 * PIO+2.331e-05 * MO+0.07 * TP-0.003 * GGR+0.012 * UR-0.299 * SF-0.442 * NRF-0.157 * SPF-0.014 * GC-0.006 * STR-9.58 * 0.71\sim 0.003\ 6$	(25)
	$IL=-0.245 * GGR-0.186 * UR+0.11 * NAGDP+5.568 * SF+5.996 * PCF+0.99 * SPF+70.823$	(26)
	$BL=TL-CL-FL-GL-WA-IL$	(27)

表 3 5 种情景设置的说明  
Table 3 Instructions for 5 scenario settings

情境设置	GDP 增长率	城市化率	社会因子	自然因子	污染治理因子	科技进步因子
自然趋势	natural	natural	natural	natural	natural	natural
经济发展	superior	natural	natural	natural	natural	superior
社会进步	natural	superior	superior	natural	natural	natural
资环保护	natural	natural	natural	superior	superior	natural
协调发展	average	average	average	average	average	average

注: natural 为一般发展状态; superior 为相对快速发展状态; average 为一般发展状态和相对快速发展状态的平均发展状态。

2.4 模型检验与修正

在模型关系和数学模型构建后,需对模型采取有效性检验和修正。通过相对误差计算,对铜陵市资源型城市转型系统动力学模型中 2005—2020 年的历史



真实数据与模型方程模拟 2005—2020 年的结果进行检验和修正,公式为:

$$\theta=\frac{|A-A^{*}|}{A}\times 100\% \tag{28}$$

式中: $\theta$  为相对误差,反映出模型模拟值的可信程度; $A$  为真实值; $A^{*}$  为与  $A$  对应的模拟值。

土地利用总面积的平均相对误差为 0.315%,模型精度整体较高<sup>[31]</sup>。分别来看,耕地、林地、水域、建设用地的平均相对误差均小于 3%,草地略高于其他用地的误差,但仍小于 10%,符合拟合精度要求<sup>[32]</sup>,由于未利用地面积过小,模型检验误差参考总用地面积误差,综上所述,可以用此模型模拟未来土地利用变化情况。

### 3 结果与分析

基于系统关系、数学模型和发展情境构建,通过 Vensim 软件,将模型预测初始年份设置为 2021 年,终止年份为 2035 年,得到铜陵市各个地类多情境下的模拟结果。在不同的发展情境下,各用地类型的土地利用变化趋势均符合发展状态预期,呈现出平稳性、差异性的变化特征。基于滚动预测基础,不同发展情境下的各项指标对土地利用变化产生时序性影响,各地类随预测年份的增加而不断发生变化(图 5)。整体来看,地类的情境趋势发展差异性较为相似,即

为以自然发展趋势为参照,耕地、林地、水域、草地和未利用地的减少幅度自经济发展、社会进步、综合发展而递减,但变动差异性为耕地最大、水域和林地次之、草地和未利用地最小。

为顺应经济发展带来的建设用地需求增加,耕地、林地、水域、草地通常会以多种方式转变其原生性用途,本文设置的经济发展前景即以经济发展为主要目标,按照单位面积土地产出为重要衡量标准,建设用地所承载的产业能够实现这一目标,因此通过其他用地面积减少满足建设用地面积扩张带来的用地数量结构变动。按照 5 种情境的预测,耕地面积减少最多至 2035 年分别发展为 1 670.69,1 620.46,1 634.63,1 675.91,1 650.42,变化率分别为-6.44%,-9.25%,-8.46%,-6.15%,-7.58%。水域和林地变动差异减少性次之。水域至 2035 年的变化率分别为-5.03%,-8.35%,-7.37%,-4.50%,-6.32%,面积变动极差为 14.82 km<sup>2</sup>。林地至 2035 年分别减少 23.52,30.96,30.01,22.33,26.71 km<sup>2</sup>,变动率极差为 1.5%。草地和未利用地因总体面积较少,面积变动数值较少,但变动率相对较大。2020 年面积分别为 0.17,0.000 616 km<sup>2</sup>,在情境差异视角下,草地至 2035 年分别为 6.70,5.03,5.88,9.73,6.84 hm<sup>2</sup>。未利用地至 2035 年分别为 0.051 7,0.046 5,0.049 1,0.056 2,0.050 8 hm<sup>2</sup>。两类用地的变动率极差分别为 27%和 15.75%。

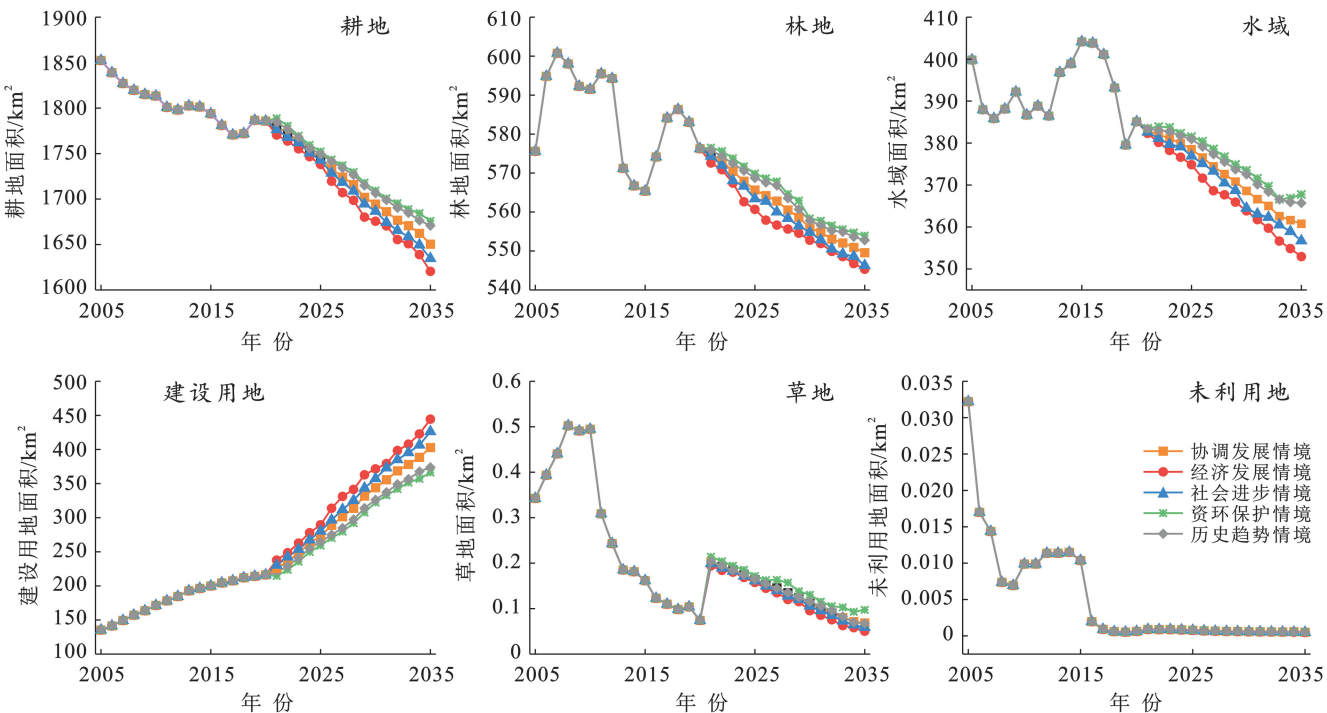


图 5 2005—2035 年铜陵市各土地利用类型情境模拟

Fig.5 Simulation results for each location class scenario of Tongling City during 2005—2035

建设用地的变化方向与上述5种地类相反,即以自然发展趋势为参照,增加幅度自资环保护、综合发展、社会进步、经济发展情境递增,至2035年,面积分别为373.89,444.46,426.16,366.06,402.94 km<sup>2</sup>,变动率分别为72.86%,105.49%,97.03%,69.24%,86.29%,变动率极差为36.25%。建设用地面积在不同情境间的差异性即可一定程度地体现当前发展趋势不唯经济发展论的时代背景。自改革开放以来,为满足快速发展国家经济的目标,众多产业喷涌而出以及城市化进程加快,促使城市建设区扩张迅猛。随着国家对于经济发展质量要求的提升,为保障国家粮食安全提出的 $1.20 \times 10^6$  km<sup>2</sup>耕地红线不突破,为保护生态环境提出的保护林地、水域、草地等发展目标后,建设用地扩张速度得到有效控制。本文设置的资环保护情境即为重点保护耕地、林地、水域、草地等具备生态功能的用地不被随意转变其用途,因此建设用地面积相较其他发展情境增加幅度有所减少。

本文依照前文系统动力学中具有代表性的六项指标,按照其不同的状态组合设置5种情境来预测土地利用结构的未来变化趋势,表明用地结构变动受经济、社会、自然环境等各种要素的牵制和影响。当GDP增长率和科技进步水平较高时,表明此时的社会发展突出经济增长速度,反映到用地结构变动中即为耕地、林地、水域、草地等地类面积减少来满足建设用地增长的现实需求。当城市化水平提升带来的基础设施建设和公共服务建设增加时,除却考虑经济发展还要考虑社会公平性和人民幸福感,城市建设就不能只满足经济要求,还要考虑生态宜居性和社会满意度。资环保护情境的设置即为考虑到在经济社会的快速发展进程中,会一定程度地依赖自然资源的获取,以及人类生产生活行为不可避免地带来了环境污染,需要在城市发展迈向新阶段的历史时期,特别是针对资源型城市的资源开采和工业污染等历史遗留问题,加强资源的保护和高效利用以及生态环境的保护。为顺应中国式现代化的历史进程,顺应高质量发展的现实需求,采用全局、综合视角设置协调发展情境,即将GDP增长、科技水平进步、城市化水平提升、基础设施建设和公共服务建设增加、生态环境保护等多种发展目标均融入考核体系,促进资源型城市转型进程沿着协调、均衡、可持续的方向迈进。

## 4 结论

本文通过分析资源型城市转型发展的理论内涵,构建铜陵市城市转型子系统和土地利用综合系统,构建不同情境下铜陵市土地利用仿真模拟,得出不同情

境下的土地利用结构。

(1) 铜陵市土地利用结构规模与空间分布呈现耕地面积减少、分布整体广泛,建设用地数量增加、向外围扩展,林地和水域基本保持现状的基本特征。而经济社会发展现状给予了城市发展一定的优势本底条件,但也需要补足发展短板,将其作为转型发展的依据进行转型条件设置并进行土地利用结构变化的合理预测。

(2) 资源型城市转型发展作为一个系统性概念,构成“系统—指标—要素”的层级框架。由经济、社会、人口、科技和资源环境子系统共同影响,GDP增长率、社会发展质量、人口、社会进步水平和资源环境水平是表征性指标,而其中的具体要素不仅相互关联、密不可分,还相互作用于不同的地类,影响土地利用系统。

(3) 基于系统动力学模拟仿真软件Vensim,进行铜陵市转型的土地利用模拟。整体来看,地类的情境趋势发展差异较为相似,即耕地、林地、水域、草地和未利用地的减少幅度自经济发展、社会进步、综合发展而递减,在资源保护情境下面积均有小幅度提升。而建设用地则相反,增加幅度自经济发展、社会进步、综合发展而递减,在资源保护情境下扩张程度得到一定程度的控制。而从地类细分视角来看,不同情境下的用地变化存在显著差异性。

## 5 展望

资源型城市转型研究和国土空间布局优化研究是当前国家提出的推进高质量发展的重要方面,对于实现城市内部高效发展、区域整体协调发展、国土空间格局优化发展具有重要意义。就资源型城市转型发展研究来看,研究多聚焦于理论路径、要素融合等方面探索。本文试图将要素理论与结构布局相结合,以空间协调发展与要素协调共生为理念,基于上述研究结论,得出以下建议。

(1) 加强生态空间的修复力度。资源型城市发展过程中对生态环境的破坏表现为林地、草地、水域等用地类型的减少,在当前国土空间布局优化的背景下,应加强生态空间的保护力度,实现系统的修复手段。

(2) 提升建设用地的利用水平。发展过程中导致的建设用地无序扩张为转型中难以解决的问题,因此,在资源型城市转型过程中,应合理控制城镇空间增长规模,严格控制新增建设用地数量,通过市场调节盘活利用存量建设用地,实现低效用地再开发,调高建设用地的节约集约利用水平,逐步实现资源型城

市的有效转型。

(3) 优化转型方向的空间布局。资源型城市转型需有效利用其自然环境、区位条件、产业结构等,充分发挥政策的积极作用,优化探索路径的国土空间布局,因地制宜做好国土空间规划,逐步增强资源型城市的可持续发展能力和资源保障能力。

## 参考文献(References)

- [1] 崔丹,卜晓燕,徐祯,等.中国资源型城市高质量发展综合评估及影响机理[J].地理学报,2021,76(10):2489-2503.  
Cui Dan, Bu Xiaoyan, Xu Zhen, et al. Comprehensive evaluation and impact mechanism of high-quality development of China's resource-based cities [J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(10):2489-2503.
- [2] 邵帅,尹俊雅,王海,等.资源产业依赖对僵尸企业的诱发效应[J].经济研究,2021,56(11):138-154.  
Shao Shuai, Yin Junya, Wang Hai, et al. Induced effect of resource-based industry dependence on zombie firms [J]. Economic Research Journal, 2021,56(11):138-154.
- [3] Jin Xiaobin, Long Ying, Sun Wei, et al. Evaluating cities' vitality and identifying ghost cities in China with emerging geographical data [J]. Cities, 2017,63:98-109.
- [4] Bradbury J H, St-Martin I. Winding down in a Quebec mining town: A case study of Schefferville [J]. Géographies Canadiennes, 1983,27(2):128-144.
- [5] Bradbury J. The impact of industrial cycles in the mining sector: The case of the Québec-Labrador Region in Canada [J]. International Journal of Urban and Regional Research, 1984,8(3):311-331.
- [6] Hayter R, Barnes T J. The restructuring of British Columbia coastal forest sector: Flexibility perspectives [J]. BC Studies, 1997(3):7-34.
- [7] Randall J E, Ironside R G. Communities on the edge: An economic geography of resource-dependent communities in Canada [J]. Géographies Canadiennes, 1996,40(1):17-35.
- [8] Parker P. Canada-Japan coal trade: An alternative form of the staple production model [J]. Géographies Canadiennes, 1997,41(3):248-267.
- [9] Slocombe D S. Resources, people and places: Resource and environmental geography in Canada, 1996—2000 [J]. Canadian Geographer/Le Géographe Canadien, 2000,44(1):56-66.
- [10] Bates J. Gendered spaces of industrial restructuring in resource peripheries: The case of the corner brook region, Newfoundland [J]. Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie, 2006,97(2):126-137.
- [11] Han Jiazheng, Hu Zhenqi, Wang Peijun, et al. Spatio-temporal evolution and optimization analysis of ecosystem service value: A case study of coal resource-based city group in Shandong, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,363:132602.
- [12] Lu Hongyou, Liu Min, Song Wenjing. Place-based policies, government intervention, and regional innovation: Evidence from China's resource-exhausted city program [J]. Resources Policy, 2022,75:102438.
- [13] Ruan Fangli, Yan Liang, Wang Dan. Policy effects on the sustainable development of resource-based cities in China: A case study of Yichun City [J]. Resources Policy, 2021,72:102145.
- [14] 李文彦.我国矿产资源与地理位置的地区差异:工业布局若干条件的经济地理分析[J].地理研究,1982,1(1):19-30.  
Li Wenyan. Provincial differentiation of mineral resources and geographical position within china: An economic geographical analysis of several conditions of industrial distribution [J]. Geographical Research, 1982,1(1):19-30.
- [15] 方觉曙,葛本中,吴沛林,等.马鞍山钢铁工业发展与区域经济结构调整[J].地理科学,1989,9(3):259-266.  
Fang Jueshu, Ge Benzong, Wu Peilin, et al. Optimum production quota of Ma'anshan iron and steel company and adjustment of regional economic structure [J]. Scientia Geographica Sinica, 1989,9(3):259-266.
- [16] 朱关鑫,吴勤学.区域支柱产业的选择、优化和转换:兼论山西省产业结构的转换[J].中国工业经济研究,1990(4):49-55.  
Zhu Guanxin, Wu Qinxue. Selection, optimization and transformation of regional pillar industries: Also on the transformation of industrial structure in Shanxi Province [J]. China Industrial Economics, 1990(4):49-55.
- [17] 李文彦,樊杰.我国的经济地域结构与区域能源战略的关系初探[J].地理科学,1994,14(3):201-210.  
Li Wenyan, Fan Jie. A preliminary analysis on the relationship between the hierarchy of economic regions and energy strategy in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1994,14(3):201-210.
- [18] 王峰.资源型城市转型可持续发展研究:以陕西神木为例[D].陕西 西安:长安大学,2014.  
Wang Feng. Study on the sustainable development of resource city transformation: Taking Shenmu of Shanxi Province as an example [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2014.
- [19] 沈镭.我国资源型城市转型的理论与案例研究[D].北京:中国科学院研究生院(地理科学与资源研究所),2005.  
Shen Lei. Theoretical study on the transformation of resources-based cities in China [D]. Beijing: Graduate



- School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Geographic Sciences and Resources), 2005.
- [20] 杨显明.煤炭资源型城市产业结构演替与空间形态演化的过程、机理及耦合关系研究:以淮南、淮北为例[D].安徽 芜湖:安徽师范大学,2014.
- Yang Xianming. Study on the process, mechanism and coupling relationship between industrial structure succession and urban spatial morphology evolution of the coal resource-based city: The case study of Huainan and Huaibei [D]. Wuhu, Anhui: Anhui Normal University, 2014.
- [21] 周宏浩,陈晓红.中国资源型城市精明发展与环境质量的耦合关系及响应机制[J].自然资源学报,2019,34(8):1620-1632.
- Zhou Honghao, Chen Xiaohong. Coupling relationship and its response mechanism between smart development and environmental quality in Chinese resource-based cities [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8):1620-1632.
- [22] He Chunyang, Zhao Yuanyuan, Huang Qingxu, et al. Alternative future analysis for assessing the potential impact of climate change on urban landscape dynamics [J]. The Science of the Total Environment, 2015,532: 48-60.
- [23] 孙秀梅.资源型城市低碳转型机理与调控对策研究[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2011.
- Sun xiumei. Research on the mechanism and regulation measures of low-carbon transformation in resources-based cities [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2011.
- [24] 宋喜斌.基于系统动力学的煤炭资源枯竭型城市经济转型研究[D].北京:中国地质大学,2014.
- Song Xibin. Research on economic transformation of coal resource depleted cities based on system dynamics [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [25] 史宝娟,郑亚男,郑祖婷,等.基于系统动力学的资源型城市低碳发展路径研究[J].华北理工大学学报(社会科学版),2017,17(5):51-58.
- Shi Baojuan, Zheng Yanan, Zheng Zuting, et al. Low-carbon development path of resource-based cities based on system dynamics [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Social Science Edition), 2017,17(5):51-58.
- [26] 曾丽君,隋映辉,申玉三.科技产业与资源型城市可持续协同发展的系统动力学研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(10):85-93.
- Zeng Lijun, Sui Yinghui, Shen Yusan. Study on sustainable synergistic development of science & technology industry and resource-based city based on system dynamics [J]. China Population, Resources and Environment, 2014,24(10):85-93.
- [27] 宋戈,崔登攀,陈红霞.有色金属资源城市土地集约利用评价研究:以安徽省铜陵市为例[J].经济地理,2009,29(2):280-283.
- Song Ge, Cui Dengpan, Chen Hongxia. A study of the non-ferrous metal resources city land-use intensification evaluation: Take Tongling City of Anhui Province as an example [J]. Economic Geography, 2009,29(2):280-283.
- [28] 朱琳.资源枯竭城市转型发展可持续评价:以贾汪为例[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2013.
- Zhu Lin. Sustainability assessment of transformation development in resource-exhausted city: A case study of Jiawang [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2013.
- [29] 岳瑞峰.基于DEA模型的资源型城市土地利用效率研究:以山西省十地市为例[D].山西 太原:山西农业大学,2015.
- Yue Ruifeng. Study based on the DEA method of land use efficiency on resource-based city: As ten cities in Shanxi Province an example [D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2015.
- [30] 吕欣怡.基于InVEST模型的资源型城市碳储量时空变化研究[D].山东 曲阜:曲阜师范大学,2018.
- Lv Xinyi. Study on the temporal and spatial changes of carbon stock in resource cities based on the InVEST model [D]. Qufu ,Shandong: Qufu Normal University, 2018.
- [31] 张雄.基于系统动力学的天津市水土资源可持续利用研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- Zhang Xiong. Study on sustainable utilization of water and soil resources in Tianjin City based on system dynamics model [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [32] 胡宗楠,李鑫,楼淑瑜,等.基于系统动力学模型的扬州市土地利用结构多情景模拟与实现[J].水土保持通报,2017,37(4):211-218.
- Hu Zongnan, Li Xin, Lou Shuyu, et al. Multi-scenario simulation of land use structure of Yangzhou City based on systems dynamics model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(4):211-218.