

共享社会经济路径下湖北省土地利用 结构预测及启示 ——基于CGE模型的实证研究

宋琼¹, 金贵²

(1. 中国人民大学应用经济学院, 北京 100872; 2. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 武汉 430078)

摘要: 土地资源是自然过程与人类活动综合作用下的物质实体, 如何从自然和人文系统理解并预测土地利用对于科学制定发展规划至关重要。基于土地利用、社会经济和基础地理信息等数据, 建立综合反映产业发展与供需关系的土地利用CGE模型, 开展了共享社会经济路径(SSPs)下湖北省土地利用结构的多情景预测。研究结果显示: (1) 不同社会经济发展路径下土地利用结构差异明显, 经济与环境的权衡关系显著; (2) 低挑战的SSP1和不均衡发展的SSP4两种路径下土地利用结构的时间发展趋势相较平稳, 而区域竞争SSP3路径下土地利用结构存在明显突变, 环境账户土地面积减少10.68%, 加剧了生态安全风险; (3) 中间的SSP2和化石燃料模式的SSP5路径下土地利用结构存在较大波动, 但环境账户土地面积呈现小幅上升, 是较为兼顾经济生态的土地利用发展模式。研究结果及分析思路可为区域可持续发展路径设计和高质量国土空间布局提供参考。

关键词: 土地利用预测; CGE模型; SAM表; SSPs情景分析; 湖北省

《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》提出要在2035年广泛形成绿色生产生活方式, 生态环境根本好转, 美丽中国建设目标基本实现。作为一种与社会经济发展联系紧密的不可再生资源, 土地资源的高效利用对于实现经济社会的可持续发展、人与自然和谐相处意义重大。《全国国土规划纲要(2016—2030年)》中明确了加快构建安全、和谐、开放、协调、富有竞争力和可持续发展的美丽国土的总体目标。对土地利用结构进行准确预测, 能够为国土资源管理政策制定提供宝贵的数据支持, 帮助有关部门科学布局生产空间、生活空间、生态空间, 实现土地资源的高效利用。土地利用结构变化易受不同时空尺度上的自然、社会、经济等多种因素影响, 厘清影响土地利用结构变化的影响因素是建立土地利用变化模型的先决条件。一般而言, 区域土地利用结构在长时间尺度上是自然环境变化的集中反映, 在短时间尺度上则是社会经济发展的综合作用, 具有强烈的社会经济与环境变化复合属性^[1]。

构建的土地利用动态模型是否可以尽可能地反映社会经济环境信息, 对于准确预测未来土地利用结构十分重要。大量学者围绕关键参数、解析方程、情景设置和预测精度等进行了理论层面科学探索与区域层面案例分析。已有研究采用的模型, 既有聚焦经济活动与不同土地类型变动数量关系的模型, 如利用主成分分析法探究人口、经济、技术

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(71974070, 41501593)

作者简介: 宋琼(1999-), 女, 河北邯郸人, 硕士, 研究方向为资源与环境经济学。E-mail: jfmbdxx@163.com

通讯作者: 金贵(1986-), 男, 江苏邳州人, 博士, 教授, 研究方向为国土空间治理。E-mail: jingui@igsnnr.ac.cn

因素对扬州市土地变化的驱动作用^[2]、借助 Logistic 回归模型选取空间距离、海拔、坡度等土地驱动因子,对土地利用格局进行模拟^[3,4]、运用 Markov 模型构建概率转移矩阵估计区域土地变化情况^[5];也有多个模型结合使用,以实现优势互补的预测方法,如集成 SD 模型与 CLUE-S 模型的建模方法^[6,7]、CLUE-S 模型与 Markov 模型结合的方法^[8,9]、Markov 模型与 FLUS 模型的结合使用^[10]。由于区域土地利用的数量结构变化受到诸多因素的影响,土地利用情况在变化过程的驱动和约束机制较为复杂,上述模型为揭示土地利用变化规律提供了科学的分析手段。然而,以上研究方法虽然考虑了产业发展及相关因素对土地利用结构的影响,但在产业转型、土地高质量利用的背景下土地利用与产业发展的关系更趋复杂,传统模型难以科学预测产业发展引起的土地资源再配置效应,主要集中于两方面:一方面,采用较为笼统的经济驱动因素(如城镇化率、GDP 增速)以及将产业划分为农业和非农业的二元分类方式不能适应第二、第三产业在国民经济中地位的提升与三大产业在土地需求方面的异质性;另一方面,上述模型在揭示土地变化规律的过程中主要依赖历史经验中发现的数量规律,缺乏经济理论和经济模型的支持,譬如,回归分析模型忽视了经济系统中不同变量的相互作用,其研究得出的数量关系往往仅适合于某一特定地区,普适性不强^[11];Markov 模型中,根据预测前期时段数据所计算出的转移概率矩阵不一定能充分反映未来土地利用的变化^[12,13];CLUE-S 模型在土地利用格局的演化分析上主要以统计和经验模型为基础,过分依赖于过去的演变趋势。因此,如何充分反映土地利用变化背后宏观驱动因素的复杂性和微观主体的行为特征,提高土地利用变化模型的准确性,仍是当前土地利用的结构预测研究中亟待解决的问题。可计算一般均衡(CGE)模型能够将经济系统对外部刺激的反应行为纳入其分析体系,将经济体分解为不同部门并且在生产和需求方面考虑部门以及商品之间的相互关系,依据微观经济理论对生产函数和土地效用函数进行设定,在经济学理论的支持下,其框架更贴近经济社会的真实运行情况^[14]。近年部分学者考虑将其引入土地资源的分析与预测,包括耦合 CGELUC 与 DLS 模型,预测山东省 2015—2025 年土地利用格局^[15];构造包含效用函数的土地利用 CGE 模型,分析云南、江西省的土地结构变化等^[16,17]。

自工业化以来,大规模使用化石燃料推动了经济和科技的快速发展。然而,这种发展方式也引发了严重的全球气候变化问题。在这一背景下,联合国政府间气候变化专门委员会综合考虑了人口增长、经济发展、技术进步、全球化等因素,制定了共享社会经济路径(SSPs)情景框架。该框架所描绘未来发展的五种模式,被广泛应用于人类经济社会发展与气候的研究中。土地利用 CGE 模型能够揭示土地利用结构与经济社会的变化及相关作用关系。将 SSPs 引入土地利用结构模拟能够充分考虑气候变化引发的经济社会活动对土地利用结构的影响,对于 2035 年实现美丽中国、绿色发展的建设目标具有重要的政策参考价值。然而,现有研究仅考虑传统模式下土地利用一般规律,忽视了共享社会经济路径对土地利用结构的发展约束,致使研究成果在全球气候变化背景下服务于宏观决策的现实意义稍显不足。由于土地利用 CGE 模型以经济社会的变化影响土地利用结构为理论基础,在其中引入 SSPs 情景模拟能够充分考虑气候变化引发的经济社会活动对土地利用结构的影响,对于 2035 年实现美丽中国、绿色发展的建设目标具有重要的政策参考价值。另外,现实中围湖造田、围湖造城等活动无疑会致使水体大面积被侵占,而相关研究则通常假定水域面积恒定不变,这与现实发展特征不完全相符。更为重要的

是，传统土地利用CGE模型中环境效用函数采用了边际效用不变的线性函数^[16,17]，难以刻画现实中表现为边际效用递减的效用规律。基于此，本文在现有研究的基础上进行了改进和创新，在模型设定方面，从环境保护效用函数和水域面积约束两方面改进与发展了土地利用CGE模型；在产业发展方面，将土地资源作为生产资料进入三大产业生产过程中，体现了产业之间的土地利用的异质性；在分析框架方面，将共享社会经济路径框架与土地利用CGE模型结合，预测不同共享社会路径下湖北省2020—2035年土地利用结构，加强了土地利用CGE模型在气候变化问题下的应用能力，为土地资源管理提供了可行方案。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

湖北省位于中国中部，介于29°01'53"N~33°6'47"N、108°21'42"E~116°07'50"E之间，东西长约740 km，南北宽约470 km，总面积18.59万km²。湖北省地处长江中游，是长江干线流经最长的省份、三峡库区和南水北调中线工程核心水源区，水域面积占全省总面积的5.66%，是全国水资源的重要储存地；拥有湿地、林地、草地等多种生态系统，这些生态系统在保持生态平衡和维持物种多样性方面至关重要。与此同时，湖北省作为连接东部沿海地区和西部内陆地区的重要枢纽，处于长江经济带核心地带，也是重要的制造业与农业中心。以2017年为例，湖北省第一产业、第二产业、第三产业GDP增速为3.6%、7.1%、9.5%，第二产业、第三产业增速高于全国水平的5.9%、8.3%。因此，相较于其他地区，湖北省在平衡经济发展和生态保护，实现经济与生态协调发展的过程中面临更大的挑战。以湖北省为研究对象，对其土地利用结构进行模拟，能够更好地为生态修复与经济绿色发展提供理论依据。

1.2 数据处理与社会核算矩阵

社会核算矩阵（Social Accounting Matrix，SAM表）是以矩阵形式描述国民经济核算体系中各账户的供应和使用流量及其平衡关系的一种表格^[18]，是CGE模型中必不可少的基础^[19]。表1在传统SAM表的基础上，直接嵌入土地资源账户，其扩展方法无需

表1 2017年湖北省土地资源SAM表
Table 1 Social accounting matrix of land resources in Hubei province in 2017

	活动	商品	要素	居民	企业	政府	税收	储蓄投资	其他地区	环境账户
活动		94458.0								
商品	58979.9			12754.5		4417.3		20853.6	7407.1	
要素	31903.3								84.9	
居民			18197.4		220.6	696.0				
企业			13790.7							
政府				304.8	2457.5		3589.7			
税收	3574.8	15.0								
储蓄投资				6054.8	11112.6	1238.7			2447.5	
其他地区		9939.5								
土地资源	107357.3									78545.7

注：表中土地资源账户单位为km²，其他账户单位为亿元。

将土地资源价值货币化,从而避免了其他研究中估算土地资源的货币价值这一步骤存在的误差。具体为在SAM表中将投入产出表中的42部门整合为三大产业部门,活动账户和商品账户均包括第一产业、第二产业、第三产业;要素账户包括劳动和资本,税收账户包括劳动增值税、资本增值税和关税,湖北省外中国境内和中国以外地区合并至“其他地区”账户。数据来源于《中国地区投入产出表2017》中的湖北省投入产出表、《2017年湖北省统计年鉴》《中国财政年鉴2017》和《中国税务年鉴2017》。

土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 2018年1 km栅格百分比土地利用数据和《湖北省2018年林业统计年报》。在原始自然分类基础上,土地被合并为六种类型:耕地、林地、水域、湿地、草地和建设用地,如图1所示,并将土地利用数据分类整理到扩展的土地资源SAM表中。具体方法为:所有的耕地纳入第一产业账户;所有湿地均纳入环境账户;林地中天然林和公益林进入环境账户,商品林为第一产业的要素投入;草地中的牧草地为第一产业的要素投入,其余草地被视为环境账户中的土地资源要素;水域中,水库坑塘为第一产业的要素投入,近年来,众多河渠湖泊禁止围网捕鱼,将河渠湖泊归入环境账户;就建设用地而言,农村居民点为第一产业的建设用地,其他建设用地划分到第二产业,城镇用地依据第二产业和第三产业全社会从业人员的人口比例分配至两个产业中。由于难利用土地(裸土地、裸岩石质地)的面积为53 km²,仅占全省面积的0.0284%,且不易人为转化为其他类型土地,在文中不作考虑。土地资源账户和环境账户的具体数据详见表2。

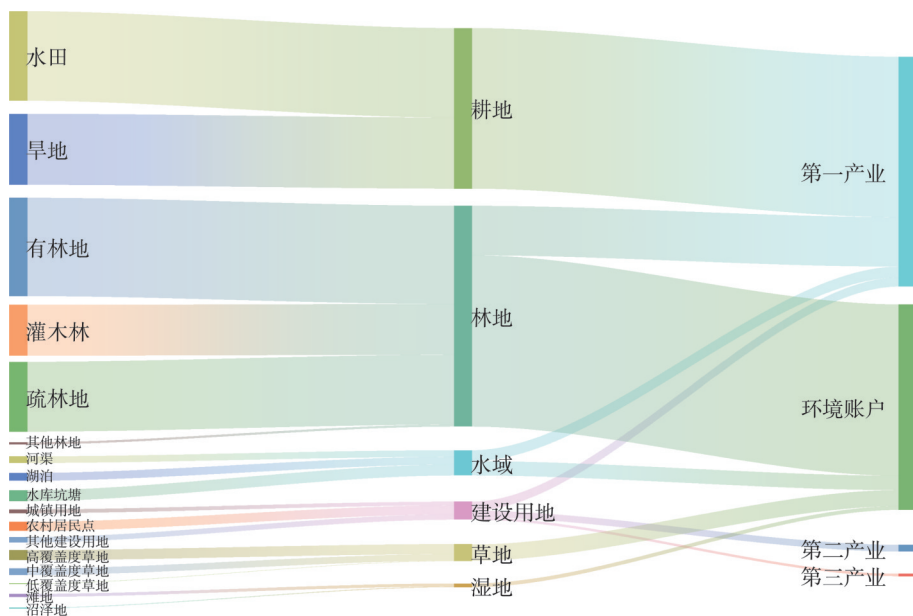


图1 土地资源的产业与生态分类标准

Fig. 1 Sankey diagram of natural resources

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用CGE模型

本文建立的土地利用CGE模型的整体框架如图2所示,模型包括各部门投入量、工资水平、劳动需求、中间要素供给、居民消费、政府消费、各类型土地面积等共计90个

表2 2017年土地资源账户和环境账户数据
Table 2 Natural resources account and environmental account data in 2017

		活动			环境账户
		第一产业	第二产业	第三产业	
商品/万元	第一产业	6409076	29816508	2422028	
	第二产业	15363713	333885942	43110259	
	第三产业	2621412	79090995	77079326	
土地资源/km ²	耕地	67206			
	林地	20715			71755
	水域	4548			5996
	湿地				1549
	草地	343			6743
	建设用地	787	2755	995	

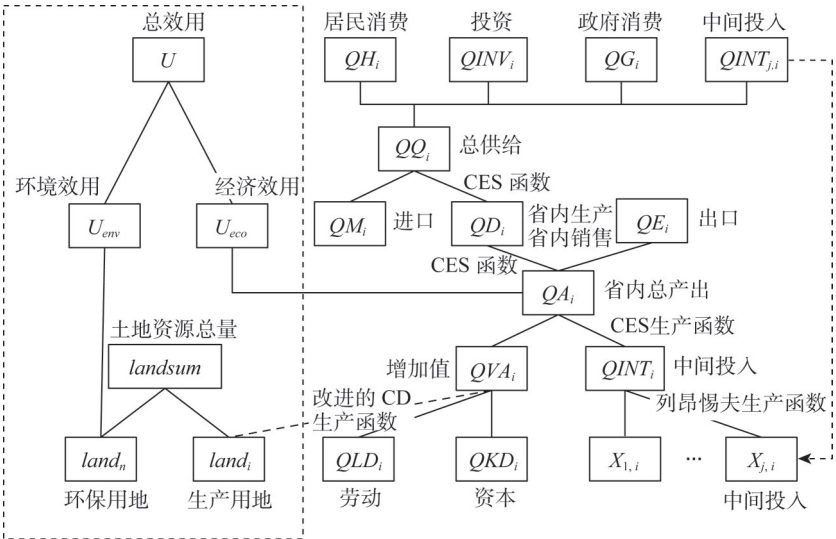


图2 土地利用CGE模型框架^[1]

Fig. 2 Framework of natural resources CGE model^[1]

内生变量，内生变量第一期的数值从土地资源SAM表中直接获得或计算得到。CGE模型通过经济的增长来实现跨期预测功能，而经济增长取决于要素投入和全要素生产率（Total Factor Productivity，TFP）的变化。要素投入包括资本要素和劳动要素的投入，即图2中的资本和劳动力供给量。由于资本的折旧率较为稳定，将资本供给量设置为内生变量，而将劳动力供给量设置为外生变量。之所以将劳动力供给量设置为外生变量，是因为劳动年龄人口的变化主要受到人口以及年龄结构的影响，有其自身的规律性，人口统计领域的研究提供了更加直接可靠的预测数据。TFP增长率，即技术水平，衡量的是排除要素投入增加而导致的产出增长。由于气候变化挑战这一外生因素会影响技术水平，导致其在不同情景下表现出不同的增速，将其设置为外生变量。

图2中左侧虚线框内为土地利用CGE模型与传统CGE模型的区别之处。本文在构建土地利用CGE模型时做出如下假设：（1）湖北省土地总面积保持不变。（2）各个类型的

土地可根据作用不同分为两类：一是为人类的经济生产活动提供场所的土地，如耕地、建设用地和经济林等；二是满足人们的生态环保需求的土地，如自然林和公益林、禁止捕鱼的水域和湖泊等。(3) 经济活动对土地资源的需求是一个地区土地利用变化的驱动因素。(4) 土地供给等于土地需求。下文主要介绍生产函数模块和效用函数模块的核心公式。

(1) 生产函数模块

本模型的生产函数部分采用两层嵌套的生产函数，第一层总产出函数为CES生产函数，有增加值和中间投入两个投入（图2），公式如下：

$$QA_i = \alpha_i [\delta_i QVA_i^{\rho_i} + (1 - \delta_i) QINTA_i^{\rho_i}]^{1/\rho_i} \quad (1)$$

式中： QA_i 代表第*i*产业的产出（万元）； QVA_i 为第*i*产业的增加值（万元）； $QINTA_i$ 为第*i*产业的中间投入（万元）； δ_i 、 α_i 是CES生产函数的系数，由基期数据计算而得，其中 α_i 表示全要素生产率；系数 ρ_i 由外部给定，并根据产业特征赋予不同产业不同的弹性^[19]。

中间投入部分的生产函数是列昂惕夫生产函数，由投入产出表的列昂惕夫投入产出系数和中间投入计算而得。

$$QINTA_i \times ia_{ji} = QINT_{ji} \quad (2)$$

式中： ia_{ji} 是中间投入的投入产出系数，指生产一个单位第*i*产业的总中间投入，需要使用多少第*j*产业的商品； $QINT_{ji}$ 表示第*i*产业从第*j*产业获得的投入量（万元）。

增加值部分的函数如下：

$$QVA_i = b_i QLD_i^{\alpha_i} QKD_i^{\beta_i} \quad (3)$$

$$land_i = \vartheta_i QVA_i / b_i \quad (4)$$

式中： QLD_i 、 QKD_i 表示第*i*产业的劳动（万人）、资本投入（万元）； $land_i$ 表示第*i*产业占用的土地（km²）； ϑ_i 、 b_i 、 α_i 、 β_i 为系数，均由初始值计算得到。

(2) 土地效用函数模块

土地利用CGE模型通过对土地利用结构的调整实现土地总效用最大化的目标，土地效用的相关等式如下所示：

$$\max U = U_{eco}^{\alpha} U_{env}^{\beta} \quad \alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

$$U_{eco} = \prod QA_i^{x_i} \quad \sum_i x_i = 1 \quad (6)$$

$$U_{env} = \prod land_n^{x_n} \quad \sum_n x_n = 1 \quad (7)$$

$$landsum = \sum_i land_i + \sum_n land_n \quad (8)$$

式中： U 表示土地利用的总效用； U_{eco} 和 U_{env} 表示土地利用的经济效用和环境效用； QA_i 表示第*i*产业的总产出（万元）； α 、 β 、 x_i 、 x_n 是效用函数的系数； $landsum$ 表示湖北省土地总面积（km²）； $land_i$ 表示用于第*i*产业的土地面积（km²）； $land_n$ 表示环境账户中第*n*种类型的土地面积（km²）。

假设初始年份的土地利用结构实现总效用最大化的状态，以土地总面积不变为约束条件，利用基期数据，根据拉格朗日乘数法可以求解出式（8）取得最大化的条件，推算出 α 、 β 、 x_i 、 x_n 的数值，进而利用GAMS软件的nlp求解器，求解出 U 最大化情况下不同

年份的各个类型土地投入。

1.3.2 情景设定

IPCC 提出的共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 用于描述辐射强迫和社会经济发展间的关系, 反映社会在应对不同程度的减缓气候变化和社会环境适应的挑战时面临的社会与经济情况^[20]。SSPs 共有五种发展路径, 如图 3 所示。SSP1 是可持续发展路径, 低收入国家发展迅速, 各国收入差距显著缩小, 政府和机构致力于实现气候发展目标, 因此, 减缓气候变化和社会环境适应的挑战均较小; SSP2 是中间路径, 是几种情景中的中间状态; SSP3 是区域竞争路径, 国际间合作弱, 对技术革新和教育的投入少, 面临的减缓气候变化和社会环境适应的挑战都较大; SSP4 是不均衡发展路径, 发达国家产生大量碳排放, 发展中国家受到气候变化的不利影响, 减缓气候变化压力较小, 但社会环境适应压力高; SSP5 是化石燃料为主的路径, 在此路径下, 依旧采用传统的化石能源, 产生大量温室气体, 在减缓气候变化方面带来较大挑战, 在健康、教育和基础设施方面有大量投资, 科学技术和人力资本快速发展, 社会环境适应挑战较小^[21]。共享社会经济框架侧重于通过经济、人口、技术进步等变量进行气候变化条件下的社会发展描述, 其框架本身不包含与气候变化直接相关的指标, 更易于在经济和社会问题中应用。不同气候变化挑战下的社会对于教育、医疗、技术等方面的投资情况不同。因此, 不同 SSPs 路径下的社会发展中技术进步水平、受教育程度、失业率、出生率、死亡率会呈现不同的模式^[22]。TFP 增长率和劳动力供给量是本文土地利用 CGE 模型中的两个外生变量。本文在设置这两个外生变量数值时引入 SSPs 路径的假定, 以模拟不同气候变化挑战下的发展路径。在计算劳动力供给量的过程中包含了受教育程度、劳动参与率、人口年龄结构、人口数量四个变量, 以反映不同 SSPs 路径下的出生率、死亡率、教育投资、失业率和医疗水平。TFP 增长率是技术进步水平, 受到研发投入和教育水平的影响。在 SSPs 框架下, 不同气候变化挑战下, 研发和教育投入不同, 技术进步水平也不同。因此, 本文的指标能够较为全面地反映不同 SSPs 路径下的社会经济发展, 进而通过不同的经济社会发展模式, 科学预测土地利用结构。

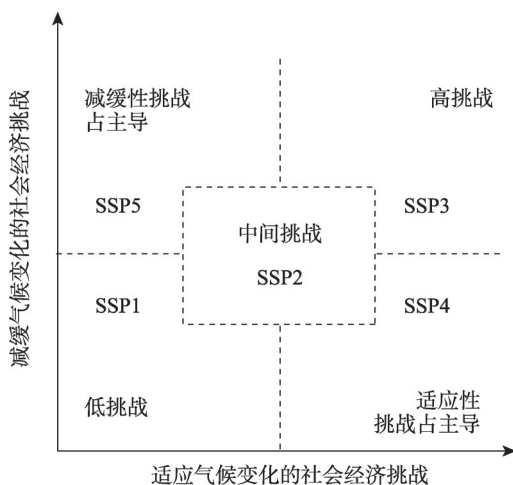


图3 共享社会经济路径^[22]

Fig. 3 Shared socioeconomic pathways^[22]

(1) TFP 增长率

全要素生产率增长率是衡量技术进步程度的重要指标变量, 也是本文建立的土地利用 CGE 模型中的外生变量之一。TFP 的增长在柯布道格拉斯经济增长模型、索罗模型等诸多经济增长模型中都是经济增长的直接来源, 在 CGE 模型中, TFP 增长率是重要的外生变量, 通过 TFP 增长率的变化来实现模型的动态经济增长。

不同的 SSPs 路径下, 区域面临的气候变化压力不同, 具有不同的经济水平、创新模式、人力资本结构, 相应地, 呈现出不同的 TFP 年均增长率。基于中国 1952—2015 年全

要素生产率的测算研究,在C-D生产函数的测算下,中国2010—2015年平均 TFP 增长率在1.6%左右^[23],又因为中部地区的增速略低于全国增速^[23],在此向下浮动10%,设湖北省的 TFP 增长率为1.53%,低水平、高水平 TFP 增长率在1.53%上下浮动50%^[22-28],分别是1.02%、2.30%^[25]。具体来看,SSP1路径、SSP2路径和SSP4路径下 TFP 增长率为1.53%;SSP3路径下 TFP 增长率为1.02%;SSP5路径下 TFP 增长率为2.30%^[29](表3)。

表3 TFP 增长率设置值

Table 3 Setting value of TFP growth rate (%)					
路径	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
TFP 增长率	1.53	1.53	1.02	1.53	2.30

(2) 劳动力供给量

劳动力供给量计算公式如下:

$$L(t)=\sum_q H(t)\times LPR(q,t)\times P(t)\times RAT(q,t)$$
 (9)

式中: $L(t)$ 是劳动力供给量(万人); q 是分类变量,将人口分为15~64岁和65岁以上两类; H 是人力资本; LPR 代表劳动参与率(%); P 代表人口总量(万人); $RAT(q,t)$ 代表不同分类人口占总人口的比例(%)。

总人口数据和未来人口的年龄结构分别来自南京信息工程大学的人口与经济预估数据库和人口研究成果,2020年劳动年龄人口占比为71.51%,到2035年减少到64.45%^[29,30]。人力资本 H 的计算,假设第一个四年的教育能使人力资本提升13.40%,未来四年每多接受一年教育使得人力资本提升10.10%,在此之后每多接受一年教育人力资本提升6.8%^[31]。

$$H=\begin{cases} \exp(0.134MYS) & MY\leq 4 \\ \exp[0.536+0.01(MY-4)] & 4\leq MY\leq 8 \\ \exp[0.94+0.068(MY-8)] & MY\geq 8 \end{cases}$$
 (10)

式中: MYS 指平均受教育年限(年)。根据第七次人口普查公报,2020年湖北省平均受教育年限为10.12年。在SSPs框架下,SSP3路径和SSP4路径下平均受教育年限不增长,SSP2路径下平均受教育年限小幅增长,每年增加为0.041年;SSP1路径和SSP5路径下平均受教育年限显著增长,增幅为SSP2路径的两倍,每年增长0.082年^[32]。如表4,在2035年,SSP1~SSP5路径下平均受教育年限分别为12.58、11.35、10.12、10.12和12.58年。

表4 2035年平均受教育年限、劳动参与率设定值

Table 4 Average years of education and labor participation rate in 2035

路径	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
平均受教育年限/年	12.58	11.35	10.12	10.12	12.58
劳动参与率/%	66.37	66.37	65.62	67.47	68.62

根据CEIC世界银行数据库,2020年中国15~64岁年龄人口劳动参与率是67.47%,65岁以上年龄人口劳动参与率约为20%。假设15~64岁人口的劳动参与率在SSP1路径和SSP2路径下每年减少0.0765%,在2035年收敛至66.37%;SSP3路径下每年减少0.1235%,在2035年收敛至65.62%;SSP4路径下保持不变,SSP5路径下每年减少0.0765%,在2035年收敛至68.62%;假设65岁以上人口的劳动参与率在各种情景下均不变。表4中的参数在2020—2035年间为线性收敛。

2 结果分析

2.1 预测结果

以2020年为起始年,运用土地利用CGE模型,对在五种SSPs路径下2020—2035年的湖北省土地利用情况进行预测(图4)。如图4a所示,第一产业用地面积在SSP3路径下呈明显的上升趋势,2035年相较2020年面积增长了10.31%。这是因为SSP3路径下区域竞争加剧,在减缓气候变化与社会环境适应上均面临较大压力,SSP3路径下人口增长较快,人力资本投资与技术进步却较慢,需要更多的耕地保证食品和生产资料的供给。相比之下,在SSP1路径和SSP4路径下,第一产业用地面积在预测期内无明显变化。在SSP2路径和SSP5路径下,第一产业用地面积在预测期内出现了小幅波动,且在2035年均下降5%左右。SSP5路径的发展模式是以消耗化石能源为代价换取较快的技术进步,因此,第一产业面积的减少与农业技术的进步导致所需耕地面积下降有关。

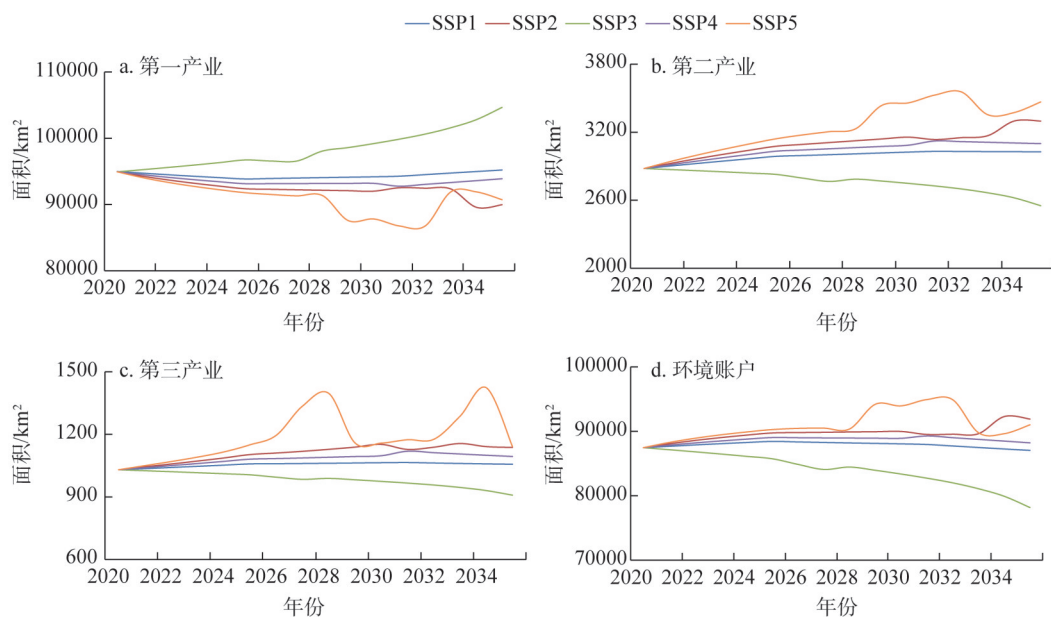


图4 SSPs路径下2020—2035年湖北省土地利用结构的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of land use structure in Hubei province from 2020 to 2035 under SSPs scenarios

在不同SSPs路径下,第二产业用地面积呈现出不同的变化趋势(图4b)。在SSP1路径、SSP2路径、SSP4路径、SSP5路径下,第二产业用地面积呈现增加趋势,其增幅按照SSP5>SSP2>SSP4>SSP1的顺序递减,在2035年的增幅分别为20.27%、14.35%、7.53%、5.10%。第二产业用地面积在SSP5路径下的显著扩张是由于该路径下以传统化石燃料的大量消耗为代价带来的经济与科学技术高速发展引起了第二产业用地面积的大幅上升;而在SSP1路径、SSP2路径和SSP4路径下,各国对化石能源的排放问题和环境保护的关注一定程度上阻碍了第二产业的发展与用地面积的扩张。在SSP3路径下,各国区域冲突加剧,技术进步和经济发展均受到影响,因此,第二产业面积呈现出下降趋势。

如图4c所示,第三产业用地面积在SSP5路径下的波动幅度较大,这可能与经济、科技高速发展下经济社会的较大变化有关;在SSP1路径、SSP2路径和SSP4路径下,第

三产业用地面积较为平稳,均呈现出小幅增加的趋势,增加幅度按照SSP2>SSP4>SSP1的顺序递减;在SSP3路径下,第三产业用地面积减少了11.58%,反映出较低的经济发展水平和较大的适应性挑战抑制了服务业的发展。

从图4d可以看出,环境账户的面积在SSP3路径下呈现出下降趋势,减少幅度达到10.68%,这与SSP3路径下面临的适应气候变化挑战和减缓气候变化挑战均十分严峻相符合。具体来看,SSP3路径下较多的人口增长和较低的技术进步水平导致人地矛盾激烈,更多土地用于种植农作物而非生态环保;在SSP1路径与SSP4路径下,环境账户面积基本保持不变;在SSP5路径与SSP2路径下,环境账户面积波动小幅增长,在2035年增加5%左右,说明在SSP5先发展再治理的路径下,也可以基本实现生态环境用地的保护。

总体而言,在SSP3路径下,土地利用结构的变化趋势最为特殊,2020—2035年,各类型土地面积变动幅度均在10%以上,第二产业、第三产业和环境账户的土地面积均显著减少,转化为第一产业用地,反映技术进步放缓与人口增加带来的结果。SSP1路径与SSP4路径表现出十分相似的变化模式,各个类型土地面积变动幅度均较小,三大产业用地面积小幅增加。SSP2路径与SSP5路径下各类型土地面积的总体变动趋势相同,但是相较SSP2路径而言,SSP5路径下各个类型土地面积的波动更加剧烈,可能与经济、科技的高速发展带来的社会变化较快有关。

为进一步分析,本文将预测期划分为三个时期:2020—2025年、2025—2030年和2030—2035年,并计算每个时期内不同SSPs路径下湖北省的土地利用变化,见图5。在低挑战的SSP1路径下,2020—2025年,第一产业用地面积减少1.09%,所减少的1036.74 km²土地转移到第二产业、第三产业用地和环境账户;2025—2030年环境账户面积下降0.39%,所下降的345.14 km²土地转移至第一、第二、第三产业中;2030—2035年环境账户和第三产业用地转化成第一、第二产业用地。适应性挑战占主导的SSP4路径下,三个时期内各个类型土地的转移方向与SSP1路径相同,只是变化幅度相较于SSP1路径更大。

在所面临的两种挑战都适中的SSP2路径下,2020—2025年和2025—2030年均表现出第一产业用地向第二产业、第三产业、环境账户转移的发展模式,第一产业用地面积分别下降了2.70%和0.39%;在2030—2035年,第一产业用地面积依旧保持下降趋势,第一产业、第三产业用地向第二产业与环境账户转移。

区域竞争的SSP3路径下,社会面临的减缓气候变化挑战和适应性挑战都较高,人口增长快、技术进步慢,图5c显示了该路径下其他类型用地向农业生产转移以满足基本粮食与生产资料的供给。在2020—2025年、2025—2030年和2030—2035年,SSP3路径下均呈现出第二产业、第三产业、环境账户面积向第一产业用地转移的规律,而且每段时期的转移份额逐渐增多。以化石燃料消耗为主的SSP5路径下,2020—2030年间,第二产业、第三产业的不断扩张引发第一产业用地向第二产业、第三产业转移。十年间,分别有575.58 km²、129.03 km²的土地从第一产业转移到第二产业、第三产业,带来了第二产业、第三产业用地面积20.00%、12.54%的增幅。

2.2 模型验证

以2017年为初始年份,利用1.3节中的土地利用CGE模型对2020年土地利用情况进行预测,将土地利用情况的预测值和实际值进行比较,结果如表5所示。从表中可以看出,

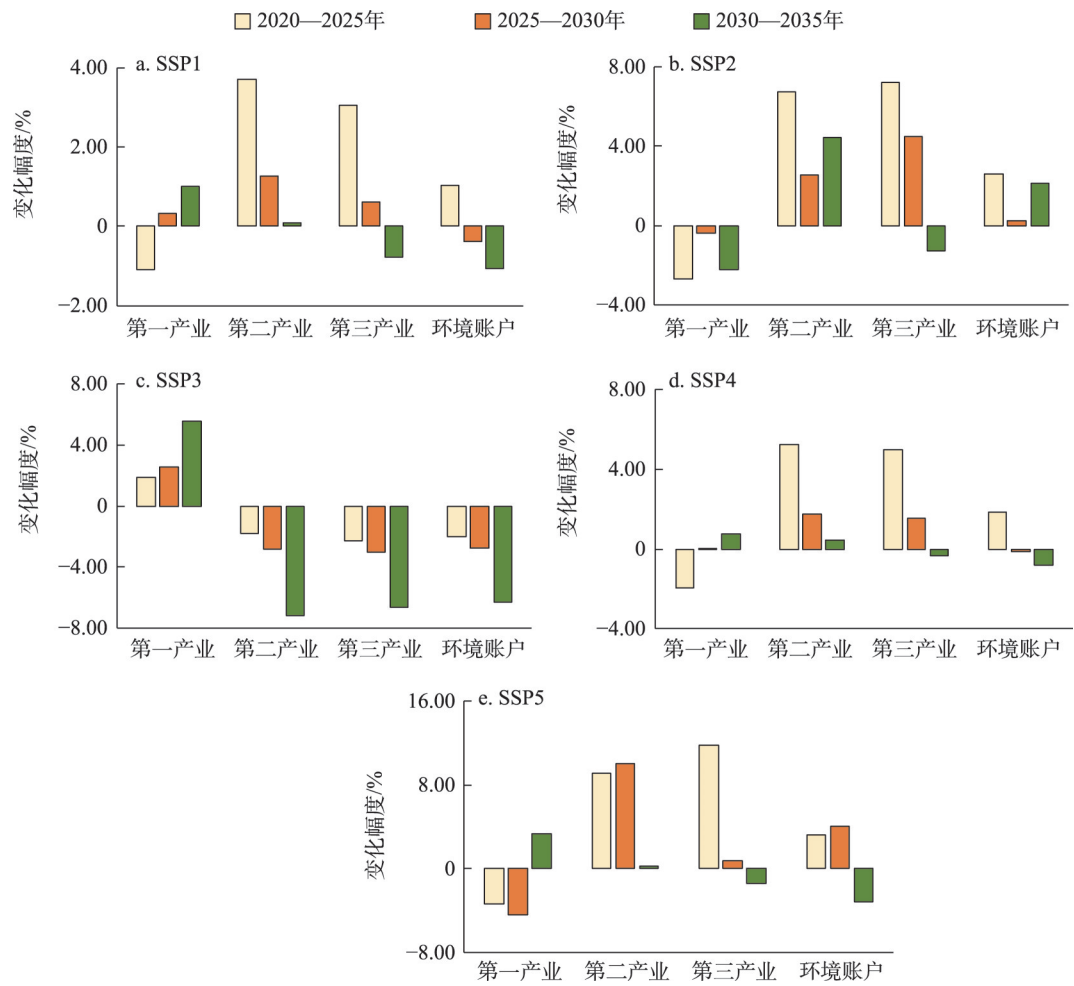


图5 SSPs路径下2020—2035年湖北省不同类型土地的变化情况
Fig. 5 Changes in land types in Hubei province from 2020 to 2035 under SSPs scenario

土地利用CGE模型预测误差较小(<4%),特别是第一产业和环境账户的预测误差均小于0.01%。由此可知,本文构建的土地利用CGE模型预测精度较好,预测结果可信度高,可以被用于SSPs路径下的土地利用结构模拟预测。

表5 2020年湖北省土地利用结构预测精度

Table 5 Prediction accuracy of land resources in Hubei province in 2020

	实际面积/km ²	预测面积/km ²	误差/%
第一产业	94950.00	94953.81	0.004
第二产业	2931.80	2879.19	1.794
第三产业	993.20	1028.59	3.563
环境账户	87524.00	87530.41	0.007

3 结论与讨论

3.1 结论

土地是经济发展的重要投入要素,本文将可计算一般均衡(CGE)模型引入土地利用的分析中,编制了土地资源SAM表,在共享社会经济路径框架下对湖北省2020—2035年土地利用结构进行预测模拟。

综合而言,在SSP1路径下,土地利用情况的变化较为稳定,三大产业用地面积小幅上升,环境账户用地面积基本不变;在SSP2路径下,研究区域保持现有发展情况,第二产业、第三产业用地增多,环境账户面积增加5%,生态环境得到了较好的保护;SSP3路径下,第一产业面积显著上升,第二产业、第三产业和环境账户用地面积被转化为第一产业中粮食和其他经济作物生产用地,特别地,环境账户面积减少10.68%,对生态环境的破坏较大,是最不理想的发展模式;SSP4路径下的土地利用情况的发展模式与SSP1路径极为相似,也是相对理想的变化路径;在SSP5路径下,以消耗大量能源为代价,经济与科技高速发展,不同类型土地面积波动幅度大。

本文得到以下主要结论:(1)社会经济挑战、减缓气候变化挑战均较低时,各账户土地变化最为平稳。(2)社会经济挑战和减缓气候变化挑战均较高时,即在SSP3路径上,第一产业面积显著上升,环境账户面积减少10.68%,大量环境账户用地面积被转化为第一产业中粮食和其他经济作物生产用地,对生态环境的破坏较大。(3)全要素生产率和人力资本提升有助于社会的土地资源向更绿色的方向发展。在五种路径中,环境类土地资源减少最多的是SSP3路径,该发展路径面临经济发展与环境保护的双重挑战,全要素生产率和人力资本的增长率均处于较低水平。其他路径下,全要素生产率和人力资本任一要素增长率的提升都能显著改善环境类土地资源数量,可有效支持人类的环境发展需求。

3.2 讨论

在生态环境不断恶化和自然资源日渐枯竭的紧迫形势下,中国政府已经将绿色发展、绿色生活等新的理念转换为一系列政策实践,坚定走上生态优先、绿色发展之路。面对生态环境和经济发展的权衡,本文在共享社会经济路径框架下,构建土地利用CGE模型,对湖北省2020—2035年土地利用结构进行模拟预测。在研究中通过改进效用函数、放松变动假设等方式提升模型的精确性,区分了三大产业对土地需求的异质性,并考虑了气候变化挑战对出生率、死亡率、教育医疗投入、研发投入等因素的影响。但由于土地利用结构变化这一研究内容的复杂性,仍有一些因素未能得到充分考虑。(1)本文的土地利用CGE模型中并未引入政府这一部门,模拟的是在没有政策法规(如永久性基本农田保护)的情况下土地结构的演进趋势,为自然资源管理政策的制定提供方向和数据支持是本文的优势,但是模型里政策约束的缺失一定程度上也会引起模拟结果与现实世界的偏误。(2)由于气候变化对土壤、降水等影响土地利用的长期地理因素未能进入模型,本文模拟预测范围较短。

基于本文预测结果,结合绿色发展目标,得出以下政策启示:(1)加大科技创新投资、提升资源利用效率,提高全要素生产率。在五种SSPs路径中,结果最不理想的路径是减缓气候变化和社会环境适应双重挑战下技术进步率最低的SSP3路径,在SSP3路径下,环境账户面积最少,人与自然的矛盾最为剧烈。该结果说明技术进步的提升有利于减轻挑战,达到更好的发展路径。目前,湖北省的科技创新能力尚未达到全国领先水平,仍具有较高的提升空间。(2)严格落实永久性基本农田保护。在没有基本农田保护措施的情况下,在SSP2路径和SSP5路径下,第一产业用地面积将在2035年减少5%左右。考虑到国际间贸易的不确定性可能引发的粮食安全问题,湖北省作为中国粮食主产区,在实际的发展中,有必要严格落实耕地红线,加强永久性基本农田保护,提高生

产效率, 保证粮食供应的安全^[33]。(3) 重视人力资本数量的提升。不同 SSPs 路径下, 人力资本数量不同, 带来的土地利用结构变化也有所差异。人力资本数量高的路径下, 环境账户的保护情况较好, 这意味着除了出台生态方面保护相关法律法规直接进行环境保护外, 还可以通过增加教育投入、提高受教育水平等方式提升人力资本质量, 从优化劳动力市场结构、促进就业等方面增加劳动力数量, 间接促进绿色发展目标的实现。

参考文献(References):

- [1] DENG X Z, YIN F, LIN Y Z, et al. Equilibrium analyses on structural changes of land uses in Jiangxi province. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2012, 10(1): 846-852.
- [2] 牛星, 欧名豪. 扬州市土地利用变化的驱动力机制研究. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(1): 102-108. [NIU X, OU M H. A study on driving-force system of regional land-use change: Taking Yangzhou city as an example. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(1): 102-108.]
- [3] 谢花林, 李波. 基于 Logistic 回归模型的农牧交错区土地利用变化驱动力分析: 以内蒙古翁牛特旗为例. *地理研究*, 2008, 27(2): 294-304. [XIE H L, LI B. Driving forces analysis of land-use pattern changes based on logistic regression model in the farming-pastoral zone: A case study of Ongiud Banner, Inner Mongolia. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 294-304.]
- [4] 刘荣, 高敏华, 谢峰. 基于 Logistic 回归模型的土地利用格局模拟分析: 以新疆吐鲁番市为例. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 74-78. [LIU H, GAO M H, XIE F. Simulation and analysis of land use patterns based on Logistic Regression Model: A case study of Turpan. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(6): 74-78.]
- [5] HAMAD R, BALZTER H, KOLO K. Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3421, <https://doi.org/10.3390/su10103421>.
- [6] 夏敏, 张开亮, 文博, 等. 煤炭资源枯竭型城市工矿用地时空变化模拟与生态风险评价: 以江西省萍乡市安源区为例. *地理研究*, 2017, 36(9): 1773-1786. [XIA M, ZHANG K L, WEN B, et al. On simulation of changes in industrial land use and evaluation of ecological risks in a coal resource-exhausted city: A case study of Anyuan district, Pingxiang city. *Geographical Research*, 2017, 36(9): 1773-1786.]
- [7] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析. *地理研究*, 2011, 30(3): 564-576. [LIANG Y J, XU Z M, ZHONG F L. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou district of Zhangye city. *Geographical Research*, 2011, 30(3): 564-576.]
- [8] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 976-986. [HAN H R, YANG C F, SONG J P. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 976-986.]
- [9] 朱春娇, 田波, 周云轩, 等. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的浦东新区湿地演变遥感分析与预测. *复旦学报: 自然科学版*, 2015, 54(4): 431-438, 448. [ZHU C J, TIAN B, ZHOU Y X, et al. Wetland change analysis and forecasting in Pudong New Area using Markov and CLUE-S model. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2015, 54(4): 431-438, 448.]
- [10] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242. [WANG X, MA B W, LI D, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 230-242.]
- [11] GUAN D J, ZHAO Z L, TAN J. Dynamic simulation of land use change based on logistic-CA-Markov and WLC-CA-Markov models: A case study in Three Gorges Reservoir area of Chongqing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20669-20688.
- [12] 陈爱玲, 都金康. 基于 CA-Markov 模型的秦淮河流域土地覆盖格局模拟预测. *国土资源遥感*, 2014, 26(2): 184-189. [CHEN A L, DU J K. Simulation and forecast of land cover pattern in Qinhuai River Basin based on the CA-Markov model. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2014, 26(2): 184-189.]
- [13] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178. [ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178.]

- [14] 庞军, 邹骥. 可计算一般均衡(CGE)模型与环境政策分析. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1): 59-63. [PANG J, ZOU J. Computable general equilibrium (CGE) models and environmental policies anaylsis. China Population, Resources and Environment, 2005, 15(1): 59-63.]
- [15] JIN G, CHEN K, WANG P, et al. Trade-offs in land-use competition and sustainable land development in the North China Plain. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 141: 36-46.
- [16] LUO J, ZHAN J, LIN Y, et al. An equilibrium analysis of the land use structure in the Yunnan province, China. *Frontiers of Earth Science*, 2014, 8(3): 393-404.
- [17] 林英志, 邓祥征, 战金艳. 区域土地利用竞争模拟模型与应用: 以江西省为例. 资源科学, 2013, 35(4): 729-738. [LIN Y Z, DENG X Z, ZHAN J Y. Simulation of regional land use competition for Jiangxi province. *Resources Science*, 2013, 35(4): 729-738.]
- [18] 林伯强, 牟敦国. 能源价格对宏观经济的影响: 基于可计算一般均衡(CGE)的分析. 经济研究, 2008, 43(11): 88-101. [LIN B Q, MOU D G. The impact of energy price increases on macro-economy: An analysis based on CGE method. *Economic Research Journal*, 2008, 11(8): 88-101.]
- [19] 张欣. 可计算一般均衡模型的基本原理与编程. 上海: 格致出版社, 2010. [ZHANG X. Principles of Computable General Equilibrium (CGE) Modeling and Programming. Shanghai: Truth & Wisdom Press, 2010: 70-74.]
- [20] CHEN G, LI X, LIU X, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nature communications*. 2020, 11(1): 537, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.905890>.
- [21] O'NEILL B C, KRIEGLER E, EBI K L, et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169-180.
- [22] O'NEILL B C, KRIEGLER E, RIAHI K, et al. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 2014, 122(3): 387-400.
- [23] 王华. 中国GDP数据修订与全要素生产率测算: 1952—2015. 经济学动态, 2018, (8): 39-53. [WANG H. The revision of China's GDP data and the measurement of total factor productivity: 1952-2015. *Economic Perspectives*, 2018, (8): 39-53.]
- [24] 刘建国, 李国平, 张军涛, 等. 中国经济效率和全要素生产率的空间分异及其影响. 地理学报, 2012, 67(8): 1069-1084. [LIU J G, LI G P, ZHANG J T, et al. Spatial distribution and its affecting factors of economy efficiency and total factor productivity in China: 1990-2009. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1069-1084.]
- [25] 姜彤, 赵晶, 曹丽格, 等. 共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 50-58. [JIANG T, ZHAO J, CAO L G, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China. *Climate Change Research*, 2018, 14(1): 50-58.]
- [26] CUARESMA J C. Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 226-236.
- [27] LEIMBACH M, KRIEGLER E, ROMING N, et al. Future growth patterns of world regions: A GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 215-225.
- [28] DELLINK R, CHATEAU J, LANZI E, et al. Long-term economic growth projections in the shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 200-214.
- [29] 倪宣明, 沈心如, 黄嵩, 等. 我国人口结构及老龄化收敛趋势研究. 数理统计与管理, 2020, 39(2): 191-205. [NI X M, SHEN X R, HUANG S, et al. Eonvergence trend of the age structure and the aging population in China. *Journal of Applied Sport Management*, 2020, 39(2): 191-205.]
- [30] HUANG J, QIN D, JIANG T, et al. Effect of fertility policy changes on the population structure and economy of China: From the perspective of the shared socioeconomic pathways. *Earth's Future*. 2019, 7(3): 250-265.
- [31] KC S, LUTZ W. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 181-192.
- [32] KC S, LUTZ W. Demographic scenarios by age, sex and education corresponding to the SSP narratives. *Population and Environment*, 2014, 35: 243-260.

- [33] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062-1084.
[CAO Q W, GU C L, GUAN W H. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1062-1084.]

Land use modelling under the shared socioeconomic pathways: An empirical study of Hubei province based on CGE model

SONG Qiong¹, JIN Gui²

(1. School of Applied Economics, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: The main purpose of this paper is to forecast quantitative structure of land use in Hubei province from 2020 to 2035 under the framework of shared socioeconomic pathways (SSPs). Applying a new way to build social accounting matrix incorporating land use pattern, our research employs a CGE model of land use and scenario simulation under the SSPs framework, which is a new series of scenarios proposed by the IPCC based on climate change background and probable future socio-economic conditions. In SSP3 scenario, it is anticipated that there will be significant fluctuations in the areas of various land types, and the area of environmental protection accounts is forecasted to decrease by 10.68%, which poses a significant obstacle to achieving the crucial goals of fostering harmonious development between humans and the land, as well as promoting green ecological development. In contrast, in SSP1 and SSP4 scenarios, all types of land keep relatively steady. In SSP2 and SSP5 scenarios, fluctuation appears in land use structure. Nevertheless, it is noteworthy that these scenarios also indicate an increase in the allocation of resources for environmental protection accounts in 2035, which indicates that no severe damage will be inflicted on the natural environment. Based on the research, we can draw the conclusion that the prediction of CGE model is accurate, and the changes in land use structure in Hubei from 2020 to 2035 demonstrate distinct trends under different SSP scenarios. Comparing different SSPs scenarios, we discover that total factor productivity (TFP) and human capital storage have a crucial and positive effect on the conservation of environment. Thus, in order to protect our environment efficiently, measures such as increasing education input and average level of education and optimizing the structure of labor market should be taken to improve the amount of human capital storage. By considering the interplay between industrial development and land use, not only does our study contribute to the modelling of land use forecasting, but also our research provides valuable insights of future land use patterns of Hubei taking into account both economic and ecological factors, which can serve as a reference for regional sustainable development strategies and the development of a high-quality national spatial layout.

Keywords: land use prediction; CGE model; social accounting matrix; shared socioeconomic pathways; Hubei province