doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.020

粮食种植结构视角下东北黑土区耕地利用结构调控研究

张红梅[1]　宋　戈[2,3]　姚双双[4]

(1.辽宁大学公共管理学院,沈阳 110136;2.东北大学文法学院,沈阳 110169;
3.辽宁省自然资源厅土地保护与利用重点实验室,沈阳 110169;
4.沈阳市规划设计研究院有限公司,沈阳 110004)

摘要:科学模拟和调控耕地利用结构是实现种植结构优化的重要手段,对缓解粮食供求结构性矛盾具有重要意义。以东北黑土区典型县为例,基于粮食种植结构视角构建耕地利用系统动力学(System dynamics, SD)模型,预测水稻、玉米和大豆 3 种主要粮食作物的种植面积、产量和收益,通过经济、技术、市场多情景模拟提出耕地利用结构调控路径。结果表明:SD 模型模拟效果良好,平均偏离度低于 10%。预测 2019—2030 年研究区水稻和大豆种植面积将逐步增加,玉米种植面积缓慢减少。水稻和玉米产量均有所增加,大豆产量呈先增后减趋势。不同情景下3 种作物的模拟结果存在明显差异,GDP 水平提升、增加农业技术投入和农产品价格调控将有利于水稻种植面积、产量和收益增加。提升农民收入水平、加强农业技术支持和农产品价格调控对大豆种植面积、产量和收益的增加具有明显促进作用。而调控农民收入、农业技术和农产品价格对改善玉米的耕地利用结构效果不佳。通过建立种植结构调整补贴政策、推进农业机械化转型升级和健全农产品市场体系的路径组合实现耕地利用结构优化调控。研究系统阐释了耕地利用要素关系及其结构变化的内在逻辑,明确了不同情景下主要粮食作物耕地利用结构的调控路径,为区域未来粮食生产结构优化政策的制定提供依据,对实现粮食供求动态平衡、促进耕地资源高效可持续利用具有重要意义。

关键词:耕地利用;粮食种植结构;系统动力学模型;调控路径;东北黑土区

中图分类号:F302.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)03-0198-12　　**OSID**:

Regulation of Cultivated Land Use Structure in Black Soil Region of Northeast China Based on Perspective of Grain Planting Structure

ZHANG Hongmei[1]　SONG Ge[2,3]　YAO Shuangshuang[4]

(1. *School of Public Management*, *Liaoning University*, *Shenyang* 110136, *China*
2. *School of Humanities and Law*, *Northeast University*, *Shenyang* 110169, *China*
3. *Key Laboratory of Land Protection and Use*, *Department of Natural Resources of Liaoning Province*, *Shenyang* 110169, *China*
4. *Shenyang Urban Planning and Design Institute Co.*, *Ltd.*, *Shenyang* 110004, *China*)

Abstract: Scientific simulation and regulation of cultivated land use structure is an important means to realize the optimization of planting structure, and it is of great significance to alleviate the structural contradiction between food supply and demand. Taking the typical counties in the black soil area of Northeast China as an example, a system dynamics (SD) model of cultivated land use was built to predict the planting area, yield and income of the main food crops: rice, corn and soybean. Based on the multi-scenario simulation, including economy, technology and market, the regulation path of cultivated land use structure was proposed. The results showed that the SD model had a good simulation effect, and the average deviation was less than 10%. It was predicted that from 2019 to 2030, the acreage of rice and soybeans would gradually increase, and the acreage of corn would decrease slowly. The yield of rice and corn would both increase, and the yield of soybean would increase first and then decrease. There were obvious differences in the simulation results of the three crops under different scenarios. The improvement of GDP level, the increase of agricultural technology input and the regulation of agricultural

收稿日期:2022-05-31　修回日期:2022-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41971247)、辽宁省社会科学基金项目(L22CJY001)和辽宁省经济社会发展研究项目(2023lslqnwzzkt-11)

作者简介:张红梅(1992—),女,讲师,博士,主要从事土地利用与管理研究,E-mail:18640553575@163.com

通信作者:宋戈(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事土地利用与管理研究,E-mail:songgelaoshi@163.com

product prices would be beneficial to the increase of rice planting area, yield and income. Raising farmers' income levels, strengthening agricultural technical support and regulating agricultural prices would significantly promote the increase of soybean planting area, yield and income in the future. However, the regulation of farmers' income, agricultural technology and agricultural product prices had little effect on improving the cultivated land use structure of corn. The optimization of cultivated land use structure can be achieved by establishing a subsidy policy for planting structure adjustment, promoting the transformation and upgrading of agricultural mechanization, and improving the agricultural product market system. The research systematically explained the relationship between the factors of cultivated land use and the internal logic of structural changes, and clarified the regulation path of the cultivated land use structure of main food crops under different scenarios, providing a basis for the formulation of regional optimization policies for the future grain production structure, and for realizing the dynamic balance of food supply and demand. It was of great significance to promote the efficient and sustainable use of cultivated land resources.

Key words: cultivated land use; grain planting structure; system dynamics model; regulation path; black soil area of Northeast China

0　引言

粮食作物是耕地最直接的利用方式[1]。耕地利用结构是区域内各种土地利用方式在耕地上的比例关系及组合,粮食作物种植结构是对土地利用结构的进一步细化,体现一定耕作制度和社会发展阶段下人类对耕地资源的差别化利用结果[2],是耕地利用结构的最直观体现,与粮食生产安全密切相关[3]。科学调控耕地内部粮食种植结构可有效提升粮食产量与品质,平衡粮食供求结构[4],对保障国家粮食安全和促进耕地资源可持续利用具有重要作用。

目前我国粮食虽连年丰收,却面临粮食供求结构失衡和黑土区耕地资源保护利用难题。气候变化、区域冲突下全球粮食市场的风险和不确定性增强,给国内粮食供需平衡带来巨大挑战[5],大豆种植面积萎缩与玉米常年连作累积的生态代价,以及粮食种植结构失衡给农业生产安全和黑土区耕地资源可持续利用带来长期性威胁[6-7],已受到政府和学术界的广泛关注。2015 年以来,相关政策相继出台,为缓解粮食供求结构矛盾和耕地生态压力提供了方向性指导,但耕地利用结构调控手段较为单一,以行政部门下达指标任务为主,缺乏对耕地利用的系统性考虑,难以保证粮食供求结构的可持续平衡与耕地利用系统良性循环,亟待对耕地利用结构进行系统调控。学者们主要围绕粮食生产布局调整和种植结构优化展开研究,提出耕地利用结构调控策略。

相关研究多从粮食安全角度出发,基于粮食生产、社会经济、生态保护等目标[8-10],考虑区域资源条件约束、比较优势、规划政策等因素[11-13],运用比较优势指数、多指标综合评价、线性规划模型或结合多种算法提出农业生产布局或种植结构优化对策[14-17],为确定耕地利用结构调整方向和具体指标提供指导,不足之处在于缺乏从耕地利用现状到结构优化方案的演化过程和实现路径,未厘清耕地利用系统内在运行逻辑,对耕地利用管理的实践意义有限,尚需通过系统分析与模型构建,进一步探索耕地利用结构调控的实施路径。本研究基于粮食种植结构视角,将耕地利用结构变化置于耕地系统中分析,以东北黑土区典型县为例,构建系统动力学(System dynamics, SD)模型探明耕地利用系统结构及要素间的因果反馈关系,通过改变系统关键变量参数设置多种方案进行情景模拟,掌握耕地利用结构变化过程与发展趋势,提出系统性、针对性的耕地利用结构调控路径,为耕地利用结构优化及调整政策的制定提供参考。

1　研究区与数据来源

1.1　研究区概况

以东北黑土区克山县、依安县和拜泉县 3 个相互邻接的产粮大县为研究区(图 1),三县地处松嫩平原黑龙江省段中部黑土带,位于齐齐哈尔市境内,耕地资源禀赋良好,生产条件优越,耕作制度为一年一熟制。2020 年,研究区耕地作物播种总面积约 7.662×10^5 hm^2,占土地总面积的 73.26%,其主要粮食作物为水稻、大豆和玉米,3 种粮食作物面积占农作物播种总面积的比例高达 94.88%,为保障国家粮食安全和农业可持续发展做出重要贡献。2006 年以来,研究区玉米种植比例大幅度增加,大豆种植比例减少,两种作物种植面积呈“剪刀差”型的增减变化趋势,存在一定耕地利用结构失衡问题,是东北粮食主产区种植业结构调整优化的重点区域,对于本研究具有较强的典型性。

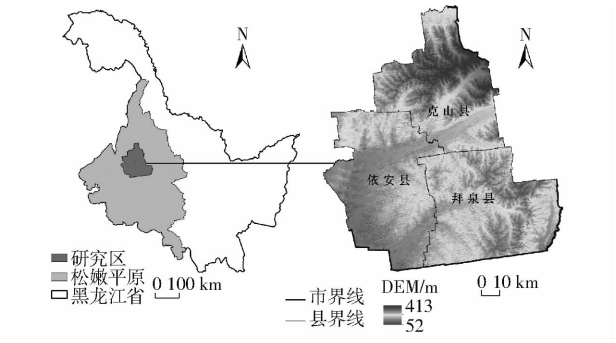

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location diagram of study area

1.2 数据来源

本研究所需数据主要为研究区社会经济和耕地利用变更数据,包括人口、GDP、农业产值、农民收入、耕地及主要作物播种面积、粮食生产投入、产量及农产品价格数据等,主要来源于 2007—2019 年《黑龙江省统计年鉴》、《齐齐哈尔经济统计年鉴》、《全国农产品成本收益资料汇编》、《克山县志》、《拜泉县志》以及市(县)统计局统计公报、政府官方网站统计数据等。

2 耕地利用系统动力学模型构建

系统动力学(SD)模型能够从宏观上反映土地利用系统的复杂行为[18],通过对系统内部要素间的关系量化与动态仿真考察土地利用要素在不同情景下的变化趋势,是一种有效的土地利用结构模拟方法,为土地利用与管理提供决策支持[19]。耕地利用系统是耕地利用各要素相互关联制约下形成的复杂有机结合体[20],是对土地利用系统内部各要素的进一步细化。运用系统动力学模型进行耕地利用结构模拟可为耕地利用结构调控路径选择提供重要依据。

耕地利用结构变化涉及各类作物种植面积变化、人口变化、经济发展和农民收入等多种要素,各要素内部含多个因子,要素与要素、因子与因子之间具有复杂的相互联系和制约关系,是一个因子众多、复杂的反馈系统,其内部关系难以利用常规解析方法量化表达,需置于动态系统中分析。系统动力学模型可以有效梳理耕地利用系统中各要素、因子之间的结构、功能及关系,并利用系统仿真技术对不同条件下的耕地利用行为进行动态模拟。本文基于粮食种植结构视角构建系统动力学模型,预测耕地利用结构变化趋势,通过多种情景进行仿真模拟,探寻耕地利用结构调控路径。

2.1 建模目的及系统边界

构建耕地利用系统动力学模型的目的是采用动态的系统模型定量分析耕地利用结构变化过程中系统内部各要素之间的反馈结构和因果关系,掌握耕地利用结构变化相关变量及作物种植面积、产量、收益的变化趋势。通过设定不同的情景方案改变系统输入变量的相关参数,对耕地利用结构进行仿真模拟,为耕地利用结构调控提供决策支持。

模型的空间边界为东北黑土区 3 个典型产粮大县——克山县、依安县和拜泉县。时间边界根据研究区作物种植面积变化特点和重要相关政策颁布时间节点确定,将模型时间边界定为 2006—2030 年。以 2006—2018 年为模拟的历史时段进行验证,2019—2030 年为预测时段,为减少预测中时段变化带来的误差,时间步长选为 1 年。模型将耕地利用系统假设为一个社会-经济复合体,重点考虑人口、经济发展、农民收入等因素变化对耕地主要作物面积的影响及因素间的因果反馈关系。

2.2 系统结构及因果关系

将耕地利用系统分为耕地子系统、人口子系统和经济子系统,各子系统及其内部要素之间相互联系、相互影响,构成了具有多重反馈的因果关系,系统因果关系图由正、负反馈环组成(图 2)。

耕地子系统是整个系统的核心部分。耕地是农作物生产的载体,作为最基本的农业生产要素,与农产品产量和第一产业发展具有直接关系。耕地是经济扩张的主要影响对象,经济发展在一定程度上促进技术发展和农业投入,有助于更好利用和保护耕地资源,但也会通过推进城市建设扩张占用部分耕地。以大豆、水稻、玉米 3 种粮食作物播种面积为主要考察对象,认为作物播种面积主要受耕地总面积、人口数量、农产品价格等因素影响,并作出关系假设:耕地面积增加时作物播种面积将有所增加;人口数量增加将导致农业从业人员数增加,进而导致耕地生产中的劳动力投入增加;农产品价格增加将提升农民种植积极性,促进相应作物播种面积增加;粮食作物播种面积变化将影响粮食总量。在耕地总面积不变前提下,某种作物面积增加将引起其他作物种植面积减少。

人口子系统是驱动耕地利用系统变化的关键。在一定人口基数下,总人口受人口变化率的影响,人口总量由乡村人口和城镇人口构成。提出关系假设:城镇人口的大量增加将带动城镇人口比例增加,城镇人口比例反映区域城镇化发展水平,对促进区域经济发展具有重要作用;乡村人口增加将导致农业从业人员数量增长,进而增加农业劳动投入;乡村人口和城镇人口变化将带来总人口变化,进而导致粮食需求和耕地利用结构变化。

经济子系统主要包括农业经济发展和整体社会

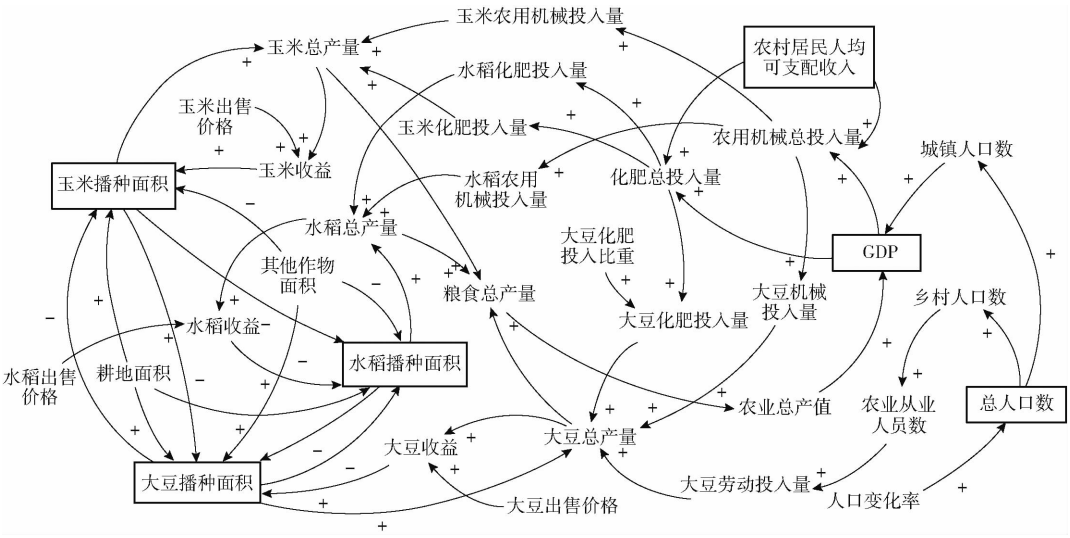

图 2　耕地利用系统动力学模型因果关系图

Fig. 2　Causality diagram of dynamic model of cultivated land use system

经济发展两方面。整体社会经济发展一般用国民生产总值(GDP)表示,由第一、二、三产业产值共同决定,农业产值提升将促进 GDP 增加。农业经济发展可用农民年收入平均水平表示。提出关系假设:农业经济和整体社会经济发展均会推动农业技术进步与发展,促进农业机械化水平提升;社会经济发展的同时人们的社会需求不断增加,特别是对于粮食需求有所增加,将导致化肥、农药等农业生产资料投入增加。

2.3　系统动力学流图构建

系统结构及因果关系分析是对系统内部各要素结构关系的定性描述,借助流图和系统动力学方程可以定量描述反馈系统。通过分析耕地利用结构变化涉及的主要因果反馈关系以及各子系统变量间的联系,模型共选取 42 个变量构建耕地利用系统动力学流图,包含 6 个存量变量、9 个流量变量、27 个辅助变量。依据模型变量收集耕地利用及社会经济相关统计数据,运用多元回归模型、C－D 生产函数、表函数等统计学方法构建变量之间的定量关系,建立系统动力学源方程(表 1),形成系统流图(图 3)。

2.4　系统动力学模型检验

为保证耕地利用系统动力学模型的有效性和可靠性,对模型进行历史检验,并通过修改模型参数进行反复检验,以提高模型精度。模拟仿真结果与历史真实值的偏离度公式为

$$e_i = \frac{Y'_{it} - Y_{it}}{Y_{it}} \times 100\%$$

式中　e_i——偏离度

Y'_{it}——第 i 个变量在第 t 年的模拟仿真结果

Y_{it}——第 i 个变量在第 t 年的实际观测值

根据模型拟合结果,2007—2018 年模拟数据与实际数据的变化趋势基本一致,平均偏离度均低于 10%,模型运行结果总体效果较好(表 2)。受多种不可控因素影响,作物播种面积年际间变化较大,部分年份作物播种面积模拟值与历史统计值存在一定预测偏差,但总体上模拟数据与历史数据能够较好拟合,认为模型的有效性在可接受范围内,可用于进一步仿真操作。

3　结果与分析

3.1　耕地利用结构仿真预测

基于耕地利用系统仿真模型和外生变量预测数据,对 2019—2030 年研究区耕地利用结构进行仿真预测,得到水稻、玉米和大豆 3 种主要粮食作物种植面积、产量和收益预测数据(图 4)。2019—2030 年,研究区 3 种粮食作物的面积、产量和收益变化趋势存在明显差异。其中水稻种植面积、产量和收益均呈逐年增加趋势,种植面积年均增加 9.07%,产量年均增加 8.23%,收益年均增长 12.22%。玉米种植面积呈逐年缓慢减少趋势,但产量逐年缓慢增加,其中种植面积年均减少 1.25%,产量年均增加 1.18%。玉米收益呈波动变化趋势,分别于 2020、2025 年产生降低和升高拐点,其中 2018—2020 年年均增长 10.54%,2021—2025 年年均减少 2.47%,2026—2030 年年均增长 1.28%。大豆种植面积呈逐年增加趋势,年均增长 3.73%。大豆产量呈波动变化趋势,2019 年和 2025 年分别为产量的低谷和峰值,2019 年产量同比减少 8.92%,2020—2025 年产量年均增加 2.30%,2026—2030 年产量年均减少 1.02%。大豆收益呈整体减少的波动变化趋势,2022—2030 年大豆收益以 1.10% 的比率逐年减少。

表 1 系统动力学模型相关变量参数及方程

Tab. 1 Related variable parameters and equations of system dynamics model

变量类型	变量	参数方程
存量变量	总人口数 X/人	INTEG(ΔX,1 572 710)
	农村居民人均可支配收入 I/元	INTEG(ΔI,2 636.67)
	GDP G_1/万元	INTEG(ΔG_1,727 724)
	水稻播种面积 S_1/hm^2	INTEG($S_{i1}-S_{d1}$,9 881)
	玉米播种面积 S_2/hm^2	INTEG($S_{i2}-S_{d2}$,136 536)
	大豆播种面积 S_3/hm^2	INTEG($S_{i3}-S_{d3}$,311 846)
辅助变量	人口变化率 X_r	WITH LOOKUP(time)
	城镇人口数 X_1/人	WITH LOOKUP(time)
	乡村人口数 X_2/人	$X-X_1$
	农业从业人员数 X_3/人	$-114\ 587+0.590\ 471X_2$
	农业总产值 G_2/万元	$221\ 741+0.155\ 376Y$
	水稻、玉米、大豆出售价格 P_1、P_2、P_3/(元·kg^{-1})	WITH LOOKUP (time)
	水稻收益 T_1/元	$20P_1Y_1$
	玉米收益 T_2/元	$20P_2Y_2$
	大豆收益 T_3/元	$20P_3Y_3$
	水稻总产量 Y_1/t	$S_1^{0.414\ 381}(MM_{w1})^{0.706\ 889}(CC_{w1})^{-0.176\ 407}$
	玉米总产量 Y_2/t	$S_2^{0.917\ 857}(MM_{w2})^{-0.168\ 274}(CC_{w2})^{0.485\ 728}$
	大豆总产量 Y_3/t	$S_3^{0.400\ 575}(MM_{w3})^{1.070\ 32}(CC_{w3})^{-1.068\ 9}(L_wX_3)^{0.410\ 424}$
	粮食总产量 Y/t	$699\ 013+1.095\ 95Y_1+0.955\ 95Y_2+0.656\ 216Y_3$
	农用机械总投入量 M/kW	$-236\ 700-75.129\ 5I+1.776\ 2G_1$
	水稻、玉米、大豆农用机械投入比重 M_{w1}、M_{w2}、M_{w3}	WITH LOOKUP (time)
	大豆劳动投入比重 L_w	WITH LOOKUP (time)
	化肥总投入量 C/t	$12\ 204.2-4.326\ 27I+0.067\ 700\ 1G_1$
	水稻、玉米、大豆化肥投入比重 C_{w1}、C_{w2}、C_{w3}	WITH LOOKUP(time)
	耕地增加面积、其他作物增加面积、其他作物减少面积 S_c、S_{o1}、S_{o2}/hm^2	WITH LOOKUP (time)
流量变量	人口变化量 ΔX/人	XX_r
	GDP 变化量 ΔG_1/万元	$-1\ 597\ 590+0.416\ 129G_2+5.182\ 21X_1$
	农村居民人均可支配收入变化 ΔI/元	WITH LOOKUP (time)
	水稻、玉米、大豆面积减少量 S_{d1}、S_{d2}、S_{d3}/hm^2	WITH LOOKUP (time)
	水稻面积增加量 S_{i1}/hm^2	$Y_1=0.035\ 837S_c-0.035\ 001S_{o1}+0.235\ 606T_1/S_1+0.114\ 8S_{d3}-0.113\ 391S_{i2}$
	玉米面积增加量 S_{i2}/hm^2	$Y_2=0.353\ 009S_c+0.213\ 469S_{o2}-0.419\ 824T_2/S_2+1.068\ 18S_{d3}$
	大豆面积增加量 S_{i3}/hm^2	$Y_3=0.811\ 132S_c-1.400\ 4S_{o1}+2.053\ 71T_3/S_3+0.705\ 682S_{d2}+0.935\ 682S_{d1}$

注:INTEG 表示积分函数;WITH LOOKUP(time)表示时间表函数。

结果表明,2019—2030 年研究区水稻种植面积、产量和收益呈相似的逐年增加变化趋势,而玉米和大豆的种植面积与其产量、收益之间的变化趋势差异较大。玉米产量未受到其种植面积逐年减少影响,反而呈逐年缓慢增加趋势。大豆种植面积虽不断增加,但产量却在 2025 年达到顶峰后持续减少。按目前发展趋势,研究区玉米和大豆产量差距自 2025 年后将逐渐拉大,呈“剪刀差”的增减变化趋势,将进一步产生玉米和大豆供求结构的不平衡,急需通过耕地利用系统调控缓解粮食供求结构失衡逐步扩大的发展趋势。

3.2 耕地利用结构情景模拟

3.2.1 模拟方案

从经济发展、农业技术和市场价格 3 方面设定情景,通过改变相关变量参数设计具体的耕地利用系统动力学情景模拟方案(表 3)。其中,经济发展反映社会经济整体水平,可通过影响农业经济和技术水平对耕地利用结构产生影响,模型以地区国内生产总值(GDP)和农村居民人均可支配收入表示经济发展情况,情景模拟方案 1 通过提升经济发展水平改善耕地利用社会经济条件,进而改变耕地利用结构。农业技术反映农业科技发展水平,农业技

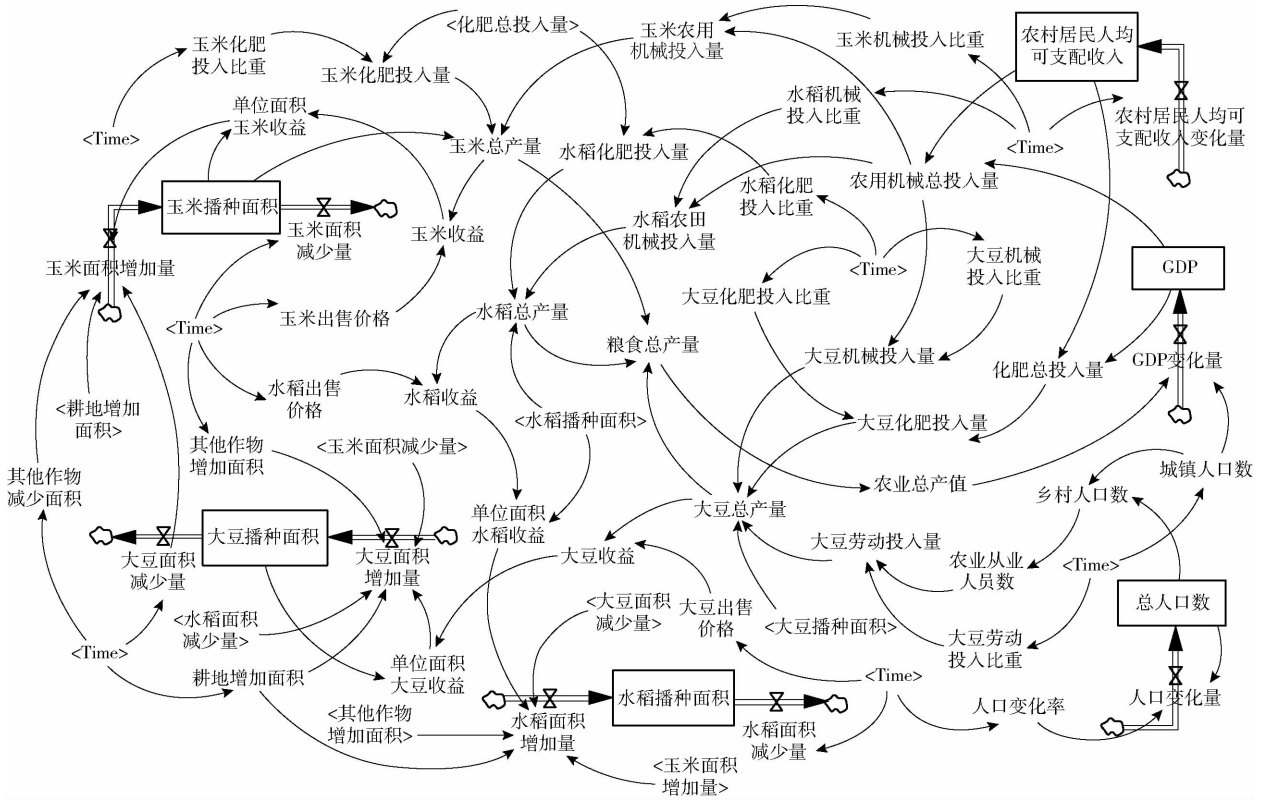

图 3　耕地利用系统动力学流图

Fig. 3　Dynamic flow diagram of cultivated land use system

表 2　研究区耕地利用系统动力学模拟结果偏离度

Tab. 2　Deviation degree of dynamic simulation results of cultivated land utilization system in study area

年份	水稻播种面积			玉米播种面积			大豆播种面积		
	模拟值/km²	统计值/km²	偏离度/%	模拟值/km²	统计值/km²	偏离度/%	模拟值/km²	统计值/km²	偏离度/%
2007	122.66	117.64	4.27	1 611.61	1 362.48	18.29	3 565.45	3 404.40	4.73
2008	140.52	139.46	0.76	1 691.83	1 772.72	−4.56	3 740.87	2 818.12	32.74
2009	167.29	155.21	7.78	1 677.32	1 971.35	−14.92	3 643.73	3 935.39	−7.41
2010	176.64	182.83	−3.39	2 201.09	2 149.84	2.38	3 529.23	3 645.92	−3.20
2011	218.61	237.88	−8.10	2 973.85	3 005.93	−1.07	2 777.06	2 884.24	−3.72
2012	263.17	293.20	−10.24	3 265.04	3 232.68	1.00	2 649.93	2 597.12	2.03
2013	308.10	342.75	−10.11	4 329.96	4 448.24	−2.66	1 770.93	1 560.55	13.48
2014	352.40	404.73	−12.93	2 900.07	3 020.69	−3.99	2 993.39	3 168.06	−5.51
2015	330.95	343.88	−3.76	3 954.62	3 954.04	0.01	2 248.09	2 181.76	3.04
2016	364.07	328.96	10.67	3 380.43	3 425.71	−1.32	2 638.77	2 636.65	0.08
2017	410.87	377.26	8.91	2 729.04	2 808.90	−2.84	3 111.93	3 253.32	−4.35
2018	372.80	295.58	26.12	3 197.00	3 395.78	−5.85	2 857.00	2 781.27	2.72
平均偏离度/%			8.92			4.91			6.92

术进步可促进农业生产力发展，提升耕地利用效率和粮食产量，主要体现在机械性技术和生物性技术进步两方面，生物性技术难以量化，因此以农用机械投入量表示农业技术投入，情景模拟方案 2 通过增加农业机械化投入强化农业技术支持，影响生产投入结构，改变耕地利用结构。市场价格调控是影响价格形成、控制价格总水平和调控微观经济行为的宏观调控过程，农产品价格反映农产品市场供需关系。研究区作为我国东北黑土区的典型粮食大县，粮食商品率较高，农产品市场价格直接影响农民收益和种植决策，进而影响耕地利用结构，情景模拟方案 3 通过调控农产品市场价格平衡作物收益，引导耕地经营主体种植决策，改变耕地利用结构。

3.2.2　模拟结果

（1）方案 1：提升经济发展水平

将农村居民人均可支配收入提升 20%，与按照现状发展相比，研究区水稻播种面积、产量和收益均有所减少，玉米播种面积有所增加，但玉米产量和收

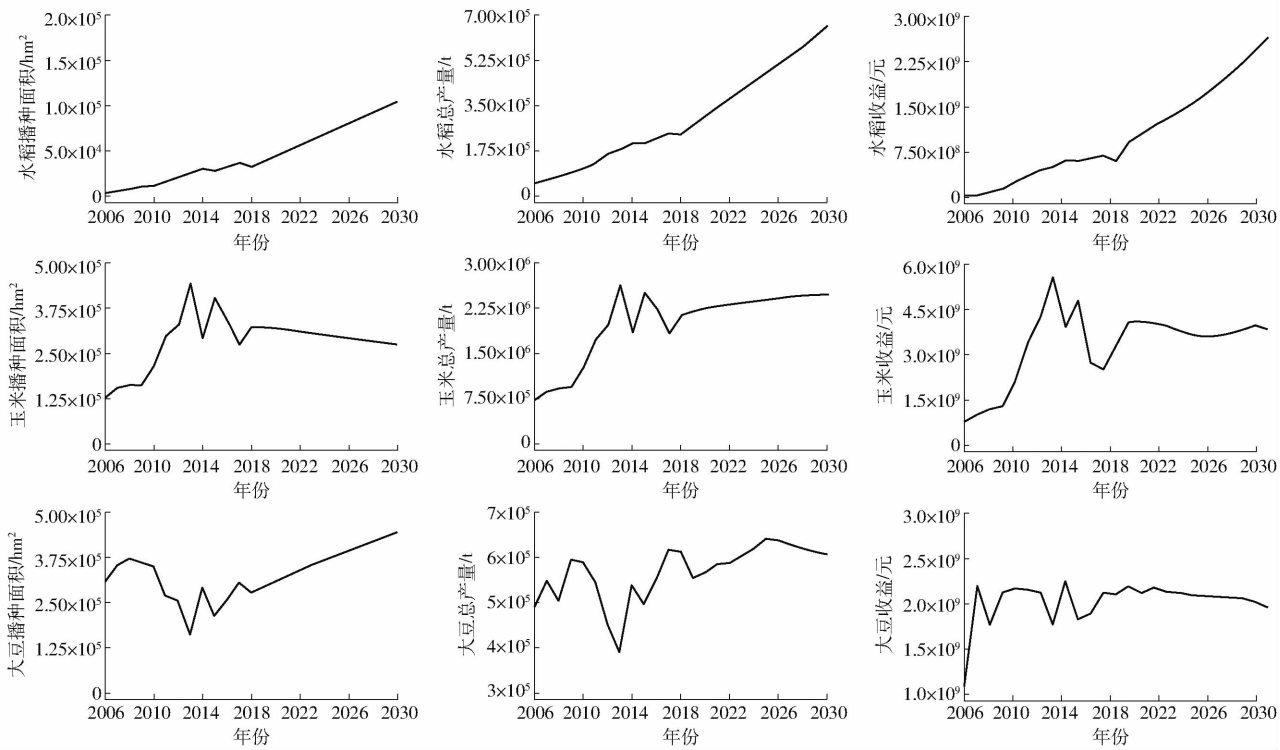

图 4 研究区主要作物种植面积、产量及收益预测结果

Fig. 4 Simulation results of main crop planting area, total yield and income in study area

表 3 耕地利用系统动力学情景模拟方案

Tab. 3 Scenario simulation scheme of cultivated land use system dynamics

方案名称	方案类别	方案特点	参数设置
现状	按照现状发展	系统模型保持不变,系统内各变量参数按照现状情况发展	不改变
方案 1	提升经济发展水平	增加 GDP 和农村居民人均可支配收入	GDP 增加 20%;农村居民人均可支配收入增加 20%
方案 2	增加农业技术支持	增加作物种植的农用机械投入量	农用机械投入量增加 10%
方案 3	加强市场价格调控	调增或调减农产品市场价格	农产品市场价格调增 10%;农产品市场价格调减 10%

益有所减少,大豆播种面积、产量和收益均有所增加。2030 年,水稻播种面积、产量和收益分别减少 3.32%、6.12% 和 6.10%。玉米播种面积增加 1.71%,产量和收益分别减少 3.78%、3.77%。大豆播种面积、产量和收益分别增加 1.65%、5.19% 和 5.21%。将 GDP 提升 20%,与按照现状发展相比,研究区水稻播种面积、产量和收益均有所增加,玉米播种面积有所减少,但玉米产量和收益有所增加,大豆播种面积有所增加,大豆产量和收益有增有减。2030 年,水稻播种面积、产量和收益分别增加 13.38%、27.40% 和 27.42%。玉米播种面积减少 4.15%,玉米总产量和收益分别增加 8.60%、8.63%。大豆播种面积增加 1.20%,大豆总产量和总收益均减少 0.91%。结果表明,提升农民收入和 GDP 水平对不同作物种植和产出结构的影响存在明显差异。提升农村居民人均可支配收入对水稻种植面积、产量和收益增加具有一定负向影响,对玉米产量和收益增加也具有负向影响,但对大豆播种面积、产量和收益增加均具有积极影响。提升 GDP 对水稻种植面积、产量和收益增加具有明显正向影响,对玉米产量和收益增加具有一定正向影响,但对大豆播种面积、产量和收益的影响不明显(图 5)。

(2)方案 2:增加农业技术支持

将农用机械投入量提升 10%,与按照现状发展相比,研究区水稻播种面积、产量和收益均有所增加,玉米播种面积、产量和收益变化不大,大豆播种面积、产量和收益明显增加。2030 年,水稻播种面积、产量和收益分别增加 5.41%、11.42% 和 11.41%。大豆播种面积、产量和收益分别增加 5.85%、13.08% 和 13.10%。结果表明,提升农用机械投入水平对研究区大豆和水稻的种植面积、产量和收益增加均具有明显的积极影响,但对玉米种植面积、产量和收益的影响不大,可通过农业技术手段调控水稻和大豆的投入和产出结构,实现耕地利用结构优化(图 6)。

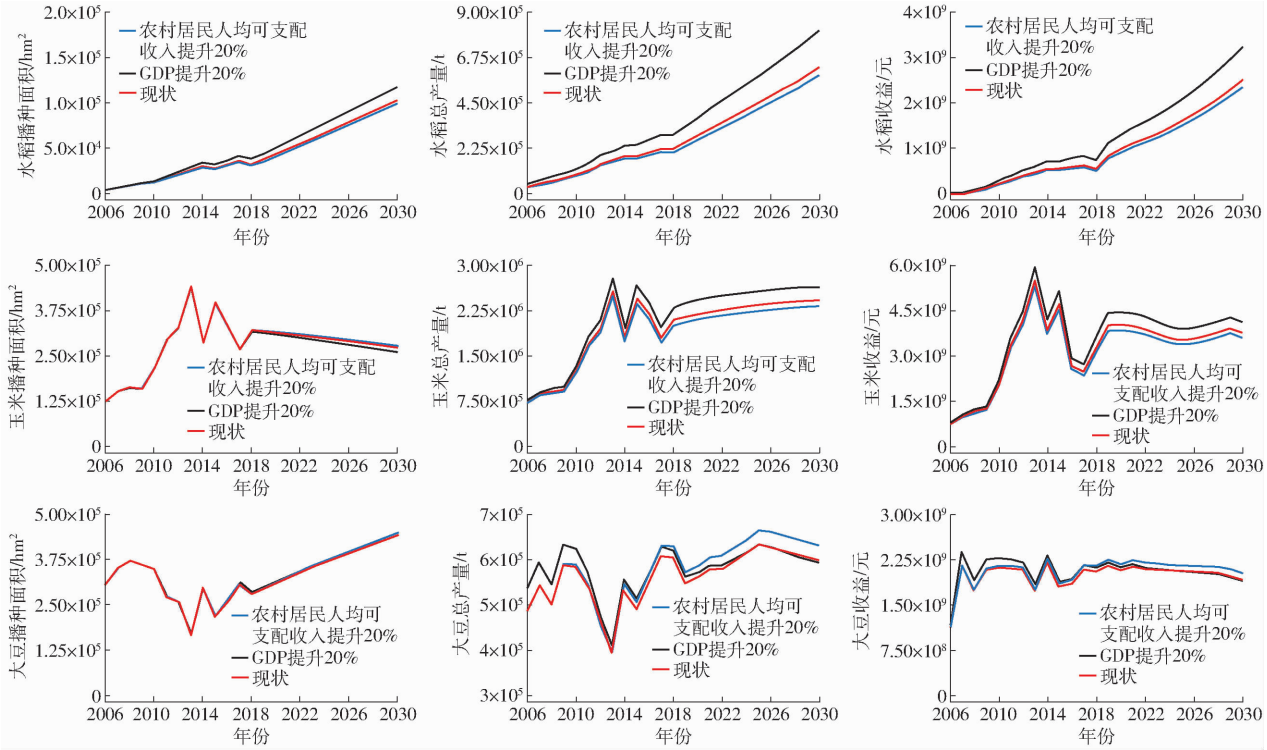

图 5　方案 1 下研究区主要作物种植面积、产量及收益预测结果

Fig. 5　Simulation results of main crop planting area, total yield and income in study area in scheme 1

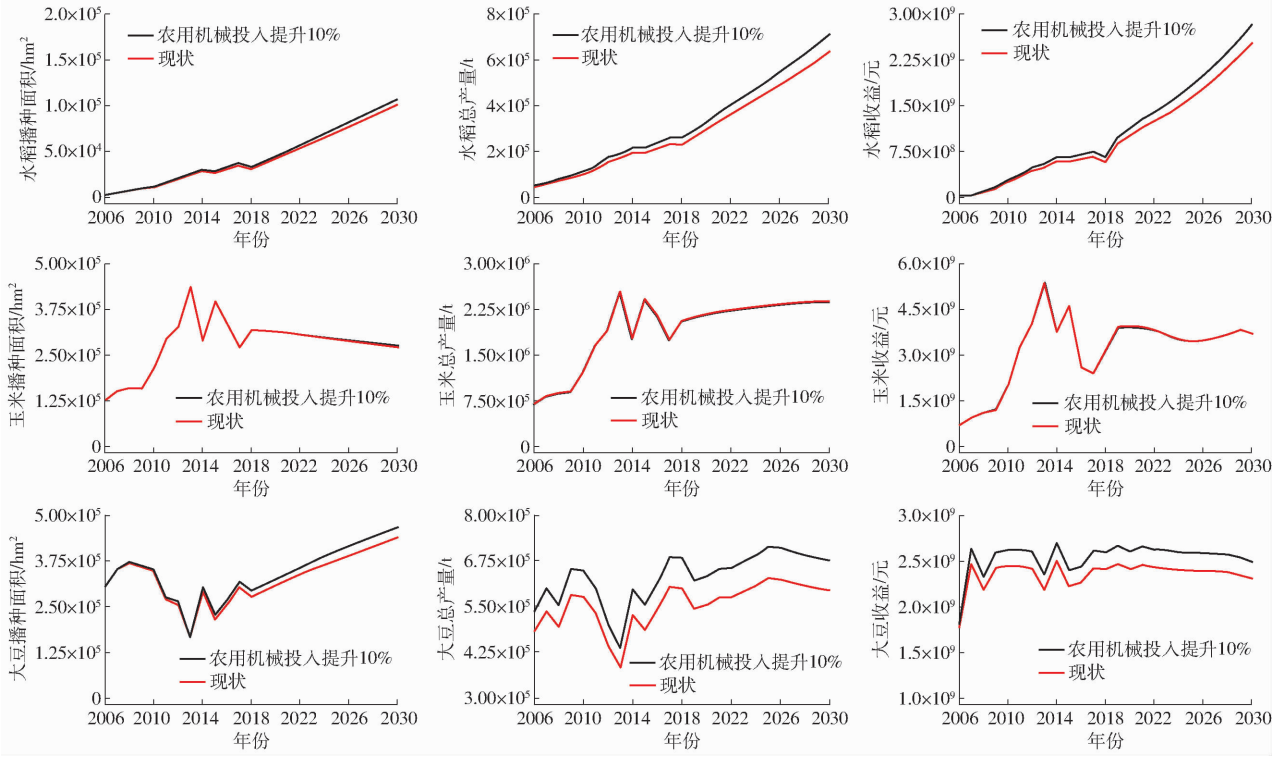

图 6　方案 2 下研究区主要作物种植面积、产量及收益预测结果

Fig. 6　Simulation results of main crop planting area, total yield and income in study area in scheme 2

(3)方案 3:加强市场价格调控

对作物出售价格进行 10% 上下调整。与按照现状发展相比,2030 年,研究区水稻出售价格调增 10%,其种植面积、产量和收益将分别增加 6.55%、2.96% 和 13.26%。水稻出售价格调减 10%,其种植面积、产量和收益将分别减少 6.71%、3.17% 和 12.86%。玉米出售价格调增 10%,其种植面积和产量将分别减少 4.04% 和 4.40%,收益增加 5.18%。玉米出售价格调减 10%,其种植面积和产量将分别增加 4.04% 和 4.40%,收益减少 6.00%。

大豆出售价格调增 10%，其种植面积、产量和收益将分别增加 5.40%、2.09% 和 12.34%。大豆出售价格调减 10%，其种植面积、产量和收益将减少 5.55%、2.24% 和 12.04%。结果表明，调增出售价格对水稻和大豆种植面积、产量和收益的增加均具有一定正向影响，对玉米收益也具有一定正向影响，但对玉米产量和收益增加有负向影响。市场价格调控对玉米、水稻和大豆生产结构调整均具有一定作用，但影响方向存在差异（图 7）。

情景模拟结果表明，不同方案下各类作物的种

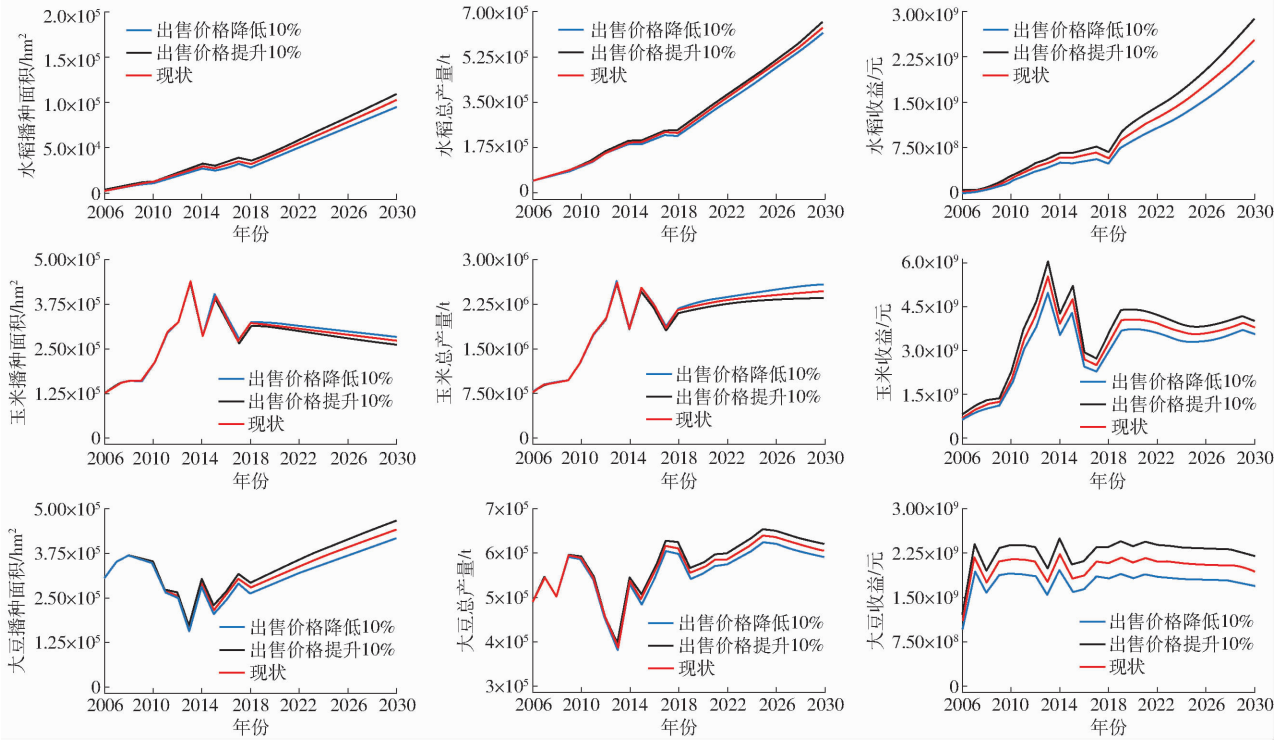

图 7 方案 3 下研究区主要作物种植面积、产量及收益预测结果

Fig. 7 Simulation results of main crop planting area, total yield and income in study area in scheme 3

植面积、产量及收益变化趋势存在明显差异。加强农业技术投入和市场价格调控对于提升水稻和大豆种植面积、产量和收益具有明显作用，但对于玉米的影响效果不佳。GDP 水平的提升对于玉米和水稻种植面积、产量及收益增加具有较好的促进作用，但对大豆的影响不明显，农村居民人均可支配收入的提升是促进未来大豆种植面积、产量及收益增加的重要因素。各情景方案对不同作物耕地利用结构的调控作用不同，需根据情景模拟结果和区域实际需求提出针对性的调控路径，保障规划指标任务有效落实，实现耕地利用结构优化目标。

3.3 耕地利用结构调控路径

基于耕地利用系统动力学仿真模拟结果，结合研究区实际情况，从农业补贴、社会化服务、市场体系 3 方面，提出耕地利用结构调控路径。依据研究区自然生态和比较优势条件对不同区域不同作物的耕地利用结构进行差别化调控，引导优势区域作物种植，充分发挥农业比较优势。2018 年，研究区水稻、大豆和玉米种植面积比为 100∶871∶864，3 种作物种植空间适宜性差异较大。基于作物种植的气候、地形、土壤和管理条件分析，研究区水稻种植适宜性水平相对较低，主要受地形因素影响，适宜种植水稻的区域面积较小，集中分布于依安县中部偏北和克山县南部。大豆和玉米种植适宜性水平较高，大豆种植优势区域主要分布于克山县、拜泉县北部和东部，以及依安县北部，玉米种植优势区主要分布于依安县和克山县西部[21]。因此，应因地制宜、统筹开展耕地利用结构调控。

3.3.1 种植结构调整补贴政策建立

根据耕地利用系统动力学仿真模拟结果，提升农村居民人均可支配收入对改变研究区耕地利用结构具有明显作用，尤其对大豆播种面积、产量和收益增加均具有明显的积极作用。支农政策转移性收入是农民收入的重要组成部分，因此可通过实施差别化的农业补贴政策，建立合理的粮食作物生产补贴机制，改善农民可支配收入，平衡作物收益，保护粮食生产者利益，进而调动耕地经营主体积极性，引导其种植决策，落实耕地利用结构优化任务。

对于大豆种植优势区域，应适度增加生产者补贴扶持力度，增加大豆种植者用于农业生产的可支配收入，引导优势区大豆生产。水稻对地形及农业灌溉设施要求较高，研究区水田资源匮乏，为稳定水

稻种植面积，可针对水稻种植优势区推行最低收购价政策，以保障水稻价格不低于某一水平，同时辅以农业基础设施建设资金支持，引导优势区水稻生产。玉米商品率较高，应充分发挥市场的资源配置作用优化调整供求结构，适当减少对其市场价格的干预，通过生产投入补贴和贷款贴息补贴等方式进行区域差别化调控，在稳定优势区玉米生产的同时，调减非优势区玉米种植面积，优化粮食种植结构。在补贴标准制定方面，充分考虑粮食品质和区域差异，保障种粮优势区农户收益。同时，鼓励发展多种形式的耕地适度规模经营，大力培育种田大户、家庭农场、农民合作社等新型经营主体，发挥其在耕地利用结构优化调整中的示范带动作用，在农业贷款、农机购置、农业技术指导等方面给予支持。

3.3.2　农业机械化转型升级推进

农业机械化是现代科技与农业生产相结合的产物，推进农业机械化生产对于提升农业生产力水平、提高农业生产效率和提升中国农业竞争力具有重要作用。耕地利用系统动力学仿真模拟结果表明，提升研究区农用机械投入水平是增加其水稻和大豆种植面积、产量和收益的重要途径之一，可将提升农业机械化水平作为耕地利用结构调控的重要切入点。针对水稻和大豆种植优势区域的农业机械化投入不足问题，重点关注其农业机械投入与转型升级，提升生产效率与效益，保障区域稻米供应，缓解大豆市场的供求结构性矛盾。

随着农业现代化不断发展，我国农业机械化水平持续提高，但小农户分散的耕地经营模式为农业机械化发展带来一定挑战，不同的作物和经营规模对农业机械提出相对复杂、多样化的要求。经调研，研究区部分作物农业机械化程度较低，农业机械设施配套不到位使得作物的生产难度和人力成本提高，成为耕地利用结构优化调整实施的重要阻碍。应进一步加强多样化的农业机械化发展和农业机械化创新，推进农业机械化转型升级，以技术带动生产。根据研究区作物生产实际情况，第一，应加强农业机械化基础设施建设，为农业机械化转型升级提供基础保障，通过高标准农田建设、农村土地综合整治措施平整土地，建设相配套的田间道路等农机作业配套设施，为农业机械化作业创造便利良好的条件。第二，应推进主要作物生产全程机械化，提升优势区域作物播种、收获、加工等各个生产环节的农业机械化投入水平，可通过促进发展农业机械跨区域使用、完善农机社会化服务体系，解决农业机械化发展区域不平衡问题，提升区域农用机械供给。第三，针对不同农作物的耕作模式促进农业机械化提档升级，创新农业机械制造技术，由单一的农机作业模式向多功能复合式的农机作业模式发展，提升农业机械使用效率和效能，满足多种作物全过程生产需求。

3.3.3　农产品市场体系健全

农产品市场是影响农民作物收益及种植决策的重要因素，农产品市场体系的建设与发展是平衡农产品供给与需求的基础。健全农产品市场体系是优化耕地利用结构，缓解农产品供求矛盾的重要途径。耕地利用系统动力学仿真模拟结果表明，调整农产品市场价格对研究区玉米、水稻和大豆生产结构改变均具有一定作用。目前，研究区农产品市场体系的建设还不尽完善，市场体系的信息化不健全，流通主体规模小、规模化流通效率低，市场体系的法律法规和政策制度有待完善。在强化种植结构调整政策扶持和推进农业机械化转型升级的同时，还应配套健全的农产品市场体系，充分发挥市场的调节作用，优化调整粮食种植结构。

健全农产品市场体系首先应健全农产品市场信息体系，对水稻、玉米、大豆等主要农产品的生产、消费、进出口、储运等重要关节进行准确的统计和监测，及时掌握粮食市场动态和趋势，建立科学的信息采集标准和动态的预测分析数据库，及时、准确地向交易主体提供价格信息、生产信息、库存信息等，引导农民优化种植结构、作物生产及经营方式，确保市场平稳运行，这是建立农产品市场体系的基础。其次，应提高交易主体的组织化程度，大力培育、扶持现有农业龙头企业、农产品运销大户，发展农民专业合作社、协会等，促进批发商、代理商和经纪人的组织化发展，逐渐提高农民进入市场的组织化程度，降低流通成本，提升农产品规模化流通效率。最后，应健全并规范农业市场运行的法律制度，对农业市场体系实施宏观调控，使现代农产品市场体系建设与标准化、制度化相结合，使其在法律保障下正常有序进行。此外，还应积极构建国际农产品市场机制，健全农产品外贸运行监控体系，增强处置农产品贸易争端能力，维护企业、农民及国家利益。

优化农业补贴、完善农业社会化服务、健全农产品市场体系均是调控耕地利用结构的重要路径，在结构调控过程中应结合不同区域的自然生态和社会经济条件差异进行路径选择与组合。同时应强化区域内耕地利用结构的统筹调控，明确调控总体目标与责任主体，对调控区域所在省、市、县、乡级政府相关部门进行目标与责任落实，通过粮食种植结构及相关土壤环境、耕地产能等指标的动态监测，建立耕地利用结构调整动态空间数据库，掌握区域作物种植空间动态信息并进行及时反馈调整，实现区域耕

地利用结构优化目标。

4 讨论

耕地利用结构变化是耕地利用系统内部要素改变引起的系统多环反馈结果,从系统角度阐释耕地利用各类要素间的因果反馈关系及动态变化过程是科学调控耕地利用结构的关键。针对目前耕地利用结构调控手段单一,实施路径缺乏系统演化分析等不足,本研究将耕地利用结构调控问题置于耕地利用系统中分析,构建系统动力学模型对耕地利用结构进行仿真与动态分析,设定不同情景模拟耕地利用结构及要素变化趋势,提出耕地利用结构调控路径,为优化耕地利用结构和平衡粮食供求结构提供管理决策依据。

耕地利用变化是一个复杂的动态过程,耕地利用结构调控是一项系统性的长期任务。基于多情景模拟的土地利用变化趋势预测是优化调控用地结构的基础[22]。本研究通过构建系统动力学模型较好拟合并模拟预测了区域耕地利用结构未来发展趋势,系统阐释了耕地利用要素关系及其结构变化的内在逻辑,明确了多情景下耕地利用结构调控组合路径,为区域耕地利用保护与管理提供决策参考。研究区粮食种植面积在耕地中占比超过 90%,本研究重点关注其主要粮食作物耕地利用结构的模拟与调控。经济作物也是耕地的重要组成部分,在一定程度上影响农民收入、生产投入方式及种植决策,考虑经济作物在耕地利用系统中的作用将有利于提升模拟预测的科学性和准确性,但相关数据的获取和处理具有一定难度,进一步补充耕地利用系统要素保证系统完整性是尚需解决的研究难题。科学构建系统动力学模型并量化相关变量关系是准确模拟预测的关键,本研究主要关注农业生产投入、产出和市场等因素对耕地利用结构的影响,借助多元回归模型、C - D 生产函数和表函数法构建系统动力学方程。受农业政策和农户行为等多种因素影响,部分年份预测结果精度尚具有一定提升空间,进一步考虑宏观政策和微观农户的影响,改进预测模型并提升预测精度是下一步研究需要解决的关键问题。

5 结论

(1)耕地利用系统动力学仿真模拟效果良好。自然发展状态下,2019—2030 年研究区水稻种植面积、产量和收益均呈逐年增加趋势。玉米种植面积逐年缓慢减少,产量逐年缓慢增加,收益呈波动变化趋势。大豆种植面积逐年增加,产量波动变化,收益呈整体减少的波动变化趋势。按目前发展趋势,2025 年以后研究区玉米和大豆产量差距将逐渐拉大,急需通过耕地利用系统调控缓解粮食供求结构失衡逐步扩大的发展趋势。

(2)提升经济发展水平、增加农业技术支持、加强市场价格调控 3 种不同情景模拟方案下,研究区各类主要粮食作物的种植面积、产量及收益变化存在明显差异,各情景方案对耕地利用结构的调节作用不同。加强农业技术投入和市场价格调控对于提升水稻和大豆种植面积、产量和收益具有明显作用,但对于玉米的影响效果不佳。GDP 水平的提升对于玉米和水稻种植面积、产量及收益增加具有较好的促进作用,但对大豆的影响不明显,大豆种植面积、产量及收益受农村居民人均可支配收入影响较明显。

(3)提出建立种植结构调整补贴政策、推进农业机械化转型升级和健全农产品市场体系 3 个耕地利用结构调控路径。应基于区域实际情况,依据国家粮食安全战略和区域自然生态、社会经济条件,因地制宜地进行调控路径选择与组合,引导优势区域作物种植,充分发挥农业比较优势。同时强化区域内耕地利用结构的统筹调控,明确调控总体目标与责任,掌握作物种植空间动态信息并及时反馈调整,实现区域耕地利用结构优化目标。

参 考 文 献

[1] 宋戈,张文琦. 粮食作物种植视角下东北粮食主产区耕地利用的时空分化特征[J]. 农业工程学报,2020,36(15):1 - 8.
SONG Ge, ZHANG Wenqi. Spatiotemporal differentiation characteristics of cultivated land use from persprctive of growing food crops in major grain production areas in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(15): 1 - 8. (in Chinese)

[2] 张红梅,宋戈. 黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素[J]. 农业机械学报,2021,52(5):239 - 248.
ZHANG Hongmei, SONG Ge. Spatial differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land planting structure in typical counties of Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 239 - 248. (in Chinese)

[3] 任频频,李保国,黄峰. 农作物种植结构演变下的黄淮海旱作区小麦玉米生产时空格局[J]. 资源科学,2022,44(3): 436 - 449.
REN Pinpin, LI Baoguo, HUANG Feng. Spatiotemporal patterns of wheat and maize production under the evolution of crop planting structures in the Huang - Huai - Hai dry farmland, China[J]. Resources Sciences, 2022, 44(3): 436 - 449. (in Chinese)

[4] 朱晶,李天祥,林大燕,等. “九连增”后的思考:粮食内部结构调整的贡献及未来潜力分析[J]. 农业经济问题,2013,34(11):36 - 43, 110 - 111.
ZHU Jing, LI Tianxiang, LIN Dayan, et al. Analysis on China's nine-year consecutive grain production growth: contribution and

future potential of inter-crop structural adjustment[J]. Issues in Agricultural Economy, 2013, 34(11):36 – 43, 110 – 111. (in Chinese)
[5] 朱晶,臧星月,李天祥.新发展格局下中国粮食安全风险及其防范[J].中国农村经济,2021(9):2 – 21.
ZHU Jing, ZANG Xingyue, LI Tianxiang. China's food security risks and prevention strategy under the new development pattern [J]. Chinese Rural Economy, 2021(9):2 – 21. (in Chinese)
[6] 倪学志,于晓媛.耕地轮作、农业种植结构与我国持久粮食安全[J].经济问题探索, 2018(7):78 – 88.
NI Xuezhi, YU Xiaoyuan. Cultivated land rotation, agricultural planting structure and China's lasting food security[J]. Inquiry into Economic Issues, 2018(7):78 – 88. (in Chinese)
[7] WANG Y, ZANG Y, ZHANG R, et al. Reduced irrigation increases the water use efficiency and productivity of winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2017, 618:112.
[8] 陈玉洁,张平宇,刘世薇,等.东北西部粮食生产时空格局变化及优化布局研究[J].地理科学,2016,36(9):1397 – 1407.
CHEN Yujie, ZHANG Pingyu, LIU Shiwei, et al. The ppatio-temporal pattern change and optimum layout of grain production in the west of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(9):1397 – 1407. (in Chinese)
[9] LINDSAY C, TODMAN K C, ALICE E M, et al. Multi-objective optimization as a tool to identify possibilities for future agricultural landscapes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687(10):535 – 545.
[10] 关小克,王秀丽,任圆圆,等.黄河沿岸不同生态功能区耕地整治与优化调控研究[J].农业机械学报,2020,51(12):175 – 183, 237.
GUAN Xiaoke, WANG Xiuli, REN Yuanyuan, et al. Regulation and optimization of cultivated land in different ecological function areas along Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):175 – 183, 237. (in Chinese)
[11] 金涛.中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J].自然资源学报,2019,34(1):14 – 25.
JIN Tao. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1):14 – 25. (in Chinese)
[12] 刘宏曼,郭翔宇.基于比较优势的黑龙江省粮食作物生产布局[J].中国农业资源与区划,2006,27(6):22 – 26.
LIU Hongman, GUO Xiangyu. Grain crops production distribution in Heilongjiang Province based on comparative advantages [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2006, 27(6):22 – 26. (in Chinese)
[13] 闫志明,蒲春玲,孟梅,等.基于城市总规的基本农田空间优化调整研究——以乌鲁木齐市高新区(新市区)为例[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6):155 – 159.
YAN Zhiming, PU Chunling, MENG Mei, et al. Study on adjustment and optimization of spatial distribution of capital farmland in suburb based on urban master plan: a case study of Urumqi high-tech industrial development zone[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6):155 – 159. (in Chinese)
[14] 黄丽丽,黄振芳.区间两相模糊多目标模型在种植结构优化中的应用——以辽宁省大连市为例[J].资源科学,2016,38(11):2157 – 2167.
HUANG Lili, HUANG Zhenfang. Application of in inexact two- phase fuzzy multi-objective programming method to crop area planning[J]. Resources Science, 2016, 38(11):2157 – 2167. (in Chinese)
[15] 谭荣,曲福田.从土地利用效益看农业布局和结构调整——以江苏省为例[J].经济地理,2006,26(6):1033 – 1036.
TAN Rong, QU Futian. Agricultural arrangement and structural adjustment based on land use revenue: a case of Jiangsu[J]. Economic Geography, 2006, 26(6):1033 – 1036. (in Chinese)
[16] CHANG Y C, KO T T. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning[J]. Land Use Policy, 2014, 36:13 – 22.
[17] 邹君,谢杨艳,李伯华,等.虚拟水战略背景下的中国粮食生产空间布局优化研究[J].地域研究与开发,2010,29(5):22 – 27.
ZOU Jun, XIE Yangyan, LI Bohua, et al. Study on spatial adjustment of food production under the background of virtual water stategy[J]. Areal Research and Development, 2010, 29(5):22 – 27. (in Chinese)
[18] 徐雅雯,甘巧林.广州 T. I. T ®创意产业园土地利用结构演化的系统动力学分析[J].中国土地科学,2015,29(9):42 – 49, 97.
XU Yawen, GAN Qiaolin. The system dynamic analysis of land utilization structure evolution for Guangzhou T. I. T ® Creative Industrial Park[J]. China Land Science, 2015, 29(9):42 – 49, 97. (in Chinese)
[19] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J].中国科学(D 辑:地球科学),2005,35(5):464 – 473.
HE Chunyang, SHI Peijun, CHEN Jin, et al. Research on land use scenario model based on system dynamics model and cellular automata model[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2005,35(5):464 – 473. (in Chinese)
[20] 宋戈,王越,赵可,等.东北区耕地利用系统安全格局模拟及其阈值的确定[J].地理研究,2015,34(3):555 – 566.
SONG Ge, WANG Yue, ZHAO Ke, et al. Pattern simulation and the determination of security threshold of cultivated land use system security in Northeast China[J]. Geographical Research, 2015, 34(3):555 – 566. (in Chinese)
[21] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov – FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947 – 3958.
CHEN Liting, CAI Haisheng, ZHANG Ting, et al. Land use muti-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov – FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(10): 3947 – 3958. (in Chinese)
[22] SONG G, ZHANG H M. Cultivated land use layout adjustment based on crop planting suitability: a case study of typical counties in Northeast China[J]. Land, 2021, 10: 107.