



流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合机制与行为调控系统效应模拟

刘桂君, 刘宇, 张倩, 吴锋

引用本文:

刘桂君,刘宇,张倩,吴锋. 流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合机制与行为调控系统效应模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 631-642.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算——以山东省高密地区为例

朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 邹晓霞

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 473-482 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0180>

生态空间格局优化与景观要素耦合视角下环水有机农业面源污染控制技术

王磊, 席运官, 潘阳, 陈秋会, 和丽萍, 李丽娜, 吴见珣, 杨育文, 刘明庆, 杨涛明, 杨赵, 田伟, 高吉喜

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 160-166 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0219>

农业高质量发展的空间分异与影响因素——以广东省为例

黄修杰

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 699-708 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0454>

集中连片贫困区耕地安全性评价及影响因素分析——以忻州市为例

高艳珍, 郑庆荣, 罗淑政, 李晓

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 919-927 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0535>

中国省际农业生态效率评价及其改进路径分析

方永丽, 曾小龙

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 135-142 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0148>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘桂君, 刘宇, 张倩, 等. 流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合机制与行为调控系统效应模拟[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 631-642.

LIU G J, LIU Y, ZHANG Q, et al. Simulation of the coupling mechanism and behavioral control effects of agricultural “Water-Land-Economic” factors in the Heihe River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 631-642.



开放科学 OSID

流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合机制与行为调控系统效应模拟

刘桂君^{1,2}, 刘宇^{3,4}, 张倩⁵, 吴锋^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 4. 中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100049; 5. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:农业系统的“水-土-经济”要素是刻画人类活动与生态-水文过程互馈效应耦合的关键界面之一。本研究以局部均衡理论为依据,基于栅格尺度的水、土、作物的空间分布数据与行政区尺度的粮食生产、消费与贸易数据嵌套,构建了行政区-栅格跨尺度的农业部门局部均衡分析“水-土-经济”要素耦合模型(Water-Land-Economic nexus Model, WLEM)。研究以黑河流域“粮改饲”补贴政策为例,模拟种植与加工环节的农机设备补贴下水土资源消耗强度与空间布局的变化,刻画农业“水-土-经济”要素的耦合机制与政策干预下行为调控的资源消耗及经济产出的系统效应。模拟发现,对种植环节的大型农机补贴增加了非水土自然要素的投入,降低了生产成本,有助于增加青贮玉米种植面积。而对加工环节进行农机补贴,可通过提高青贮技术直接影响青贮玉米作为饲料的投入,与种植环节补贴相比,其对青贮玉米产量的拉动作用较大。种植与加工环节叠加补贴在鼓励青贮玉米生产的同时,一定程度减少了籽粒玉米种植面积,符合“粮改饲”政策目标。结果表明,在政策补贴过程中需重视加工环节的农业机械补贴,并完善种植补贴和加工补贴两种政策的优势互补机制。从生产和加工两个环节补贴的空间效益来看,青贮玉米与籽粒玉米在畜牧业投入上的竞争关系使作物种植过程中水土资源要素投入呈现出空间异质性特征,这与栅格尺度上水土资源要素作为农产品成本的占比以及要素供给和替代弹性差异直接相关。该研究为制定合理的水土资源配置方案与农业发展政策,实现流域水-生态-经济协同发展提供了科学依据。

关键词:“水-土-经济”系统耦合;黑河流域;“粮改饲”政策;空间异质性;农业部门局部均衡分析模型

中图分类号:F327

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)03-0631-12

doi: 10.13254/j.jare.2021.0112

Simulation of the coupling mechanism and behavioral control effects of agricultural “Water-Land-Economic” factors in the Heihe River basin

LIU Guijun^{1,2}, LIU Yu^{3,4}, ZHANG Qian⁵, WU Feng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The “Water-Land-Economic” nexus of agricultural systems is a key interface to characterize the coupling effect of human

收稿日期: 2021-02-23 录用日期: 2021-07-14

作者简介: 刘桂君(1996—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事农业资源环境管理与政策研究。E-mail: liugj.18s@igsrr.ac.cn

*通信作者: 吴锋 E-mail: wufeng@igsrr.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51861125101); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20100104)

Project supported: International Cooperation and Exchange Project of the National Natural Science Foundation of China(51861125101); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA20100104)

activities and eco-hydrological processes. Based on the partial equilibrium theory, this study constructs a partial equilibrium analysis model of an agricultural “Water-Land-Economic” sector at the administrative-grid cross-scale based on the spatial distribution data of water, land, and crops at the grid-scale nested with the food production, consumption, and trade data at the administrative scale. The study takes the “grain-to-feed” subsidy policy in the Heihe River basin as an example, simulating the differences in the intensity of water and land consumption and the spatial layout under the subsidized agricultural equipment in planting and processing and characterizing the coupling mechanism of agricultural “Water-Land-Economic” elements and behavior under the policy intervention. The systemic effects of resource consumption and economic output of agricultural “Water-Land-Economic” factors and policy interventions were modeled. The simulation found that subsidizing large agricultural machinery in the planting process increased the input of non-land and non-water factors, reduced the production cost, and helped increase the area planted with silage corn. In contrast, subsidizing farm machinery for processing directly affected the input of silage as feed by improving silage technology, which had a more significant effect on silage production than harvesting. The overlapping subsidies for planting and processing encouraged silage production while reducing the area of seed corn planted to a certain extent, in line with the policy objective of “grain-to-feed”. The results show that policy subsidies should consider planting subsidies for processing agricultural machinery and equipment, and that a complementary mechanism of two policy subsidies, namely planting subsidies and processing subsidies to increase the input of agricultural machinery and equipment, should be implemented. In terms of the spatial benefits of subsidies in both production and processing, the competition between silage maize and seed maize in livestock input causes spatial heterogeneity in the input of land and water resources in the crop planting process. This is directly related to the proportion of land and water resource factors as the cost of agricultural products at the grid-scale and the differences in the elasticity of supply and substitution of these factors. This study provides a scientific basis for formulating reasonable land and water resource allocation plans and agricultural development policies to achieve synergistic water-ecology-economic development in the river basin.

Keywords: Water-Land-Economic systems nexus; Heihe River basin; “grain-to-feed” policy; spatial heterogeneity; partial equilibrium agricultural sector model

农业生产过程中资源利用效率与产出的经济效益协同提升是农业可持续发展的基本要求,两者的互馈耦合机制和跨尺度效应研究逐渐受到重视。近年,耦合(Nexus)思想被广泛应用于农业资源可持续利用以及环境管理与系统集成研究^[1],旨在改变以往“孤立”的研究理念,以系统视角强调要素间的联系、协同作用和权衡的重要性^[2]。水、土地资源作为农业生产过程中的重要生产要素,其禀赋差异与时空分布不仅影响宏观生态系统格局,也制约区域的农业经济发展^[3-4]。因此,刻画农业“水-土-经济”要素的耦合机制是描述生态-水文过程与人类经济活动互馈的关键。流域作为完整的自然单元,是刻画水资源与社会经济关系的最佳系统边界^[5],也是探讨水资源约束下农业可持续发展的最适宜尺度。探究流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合关系将打破行政边界的“束缚”,有助于合理配置水土资源、提升水资源利用效率、权衡流域生态保育和经济发展之间的关系,实现流域农业可持续发展。

系统建模方法是厘清复杂系统要素间相互作用关系、影响机制、演化过程和决策分析的重要手段。农业“水-土-经济”要素耦合模型主要实现了量化的

栅格尺度水、土地资源禀赋差异和区域尺度农业经济生产行为差异的自下而上的跨尺度传导,以及区域内外农产品消费需求变化引起的产品均衡价格、市场出清过程及水土资源消耗变动的自上而下约束映射^[6-8]。为实现自然过程与人类生产行为耦合的农业系统定量化模拟,部分作物模型纳入了网格化的生物物理过程参数,包括特定作物的产量、灌溉用水需求量和作物适宜面积,以捕捉资源可用性和限制因素的空间异质特征^[9-11]。也有研究利用优化方法将区域作物和牲畜产品需求分配至资源禀赋和生产效率高的空间栅格单元,并通过区域间贸易满足本地区的农产品需求^[12]。目前,农业生产模式及其环境影响模型(MAg-PIE)^[13]、全球生物圈管理模型(GLOBIOM)^[14]、农产品贸易政策分析国际模型(IMACT)^[15]、简化的栅格尺度农产品价格、土地利用和环境模型(SIMPLE-G)^[16]等全球尺度上的模型较多,应用这些模型学者们重点研究了气候变化与贸易在填补区域生产能力和区域性资源限制方面的作用^[17-18]。已有模型基于区域间不同的水土资源禀赋提出,应减少畜产品消费、合理调整作物结构,以缓解未来气候变化情景下农业水土资源消耗压力^[19-20]。也有研究将生物质能源需求引入

作物-经济系统耦合的MAGNET和CAPRI模型,进而通过经济系统中的生物能源需求扩张反馈到作物模型,以模拟土地用途转换、灌溉用水需求和生态系统的影响,厘清其对农产品价格和粮食安全的影响^[21-22]。现有模型虽成功量化了农业生产过程中水、土资源要素与经济系统间的耦合关系,但主要以全球尺度上贸易均衡为基础,同时生产过程的水资源投入主要以气候变化扰动的降雨为主。因此,大部分研究尺度大、缺乏精细尺度上的地下水资源刻画,且尚未考虑水资源的特殊性。流域是开展农业生产中水土资源耦合利用的最佳研究单元,是实施精细化的水土资源管理的空间限定。丰富流域尺度农业“水-土-经济”要素耦合模拟模型的构建,将推动宏观农业相关政策引导与空间功能管制落实的有效互补,形成更为完整的农业精准灌溉和农业集约化管理研究框架。

为丰富流域尺度农业生态-水文过程与社会经济系统互馈作用研究,本研究以中国黑河流域为例,刻画了流域范围栅格尺度上的水土资源禀赋、作物空间种植情况,以及区域内的农产品消费和贸易变动导致的价格、市场出清及资源消耗等多过程响应的互馈机制,探究了农业政策的资源消耗与经济产出变化的效应。黑河作为我国第二大内陆河,位于我国西北的干旱半干旱地区,绿洲农业是流域经济发展的支柱产业。与此同时,黑河流域面临水资源时空分布不均、土地生态功能退化以及地下水超采等问题^[23]。因此,在水资源约束下,如何进行黑河流域农业种植结构的优化,实现农业可持续发展显得尤为重要。本研究以流域作物空间分布及其生产投入的水土资源网格数据、区域内外消耗数据为基础,建立农业部门局部均衡分析“水-土-经济”要素耦合模型(Water-Land-Economic nexus Model, WLEM),以国家“粮改饲”政策下的青贮玉米的生产与加工农机设备补贴为例,比较两种不同补贴政策下的资源消耗与经济产出效应差异,为黑河流域“粮改饲”政策实施和水土资源可持续管理提供参考。

1 模型结构

流域尺度WLEM模型部门均衡分析以可计算的部门均衡分析为基础,探讨流域范围内水、土资源要素禀赋异质性约束下的作物生产与流域内外粮食消耗之间的市场出清,进而分析生产、消费或市场条件变动下的资源消耗与经济系统产出效应。WLEM模型的生产函数的嵌套结构参照了SIMPLE-G模型并

加入作物生产要素投入竞争模块,SIMPLE-G模型在长期的粮食安全与可持续发展研究中得到了广泛的应用^[24-25]。在此框架内,流域粮食市场将人口和收入等社会经济变化驱动的消费与网格化土地和水资源约束的作物生产联系在一起,以实现流域尺度上自然与经济活动的互馈,同时在模型中纳入网格化的水土资源要素与经济关系指标来反映生产异质性信息,为建设可持续和有韧性的农业系统提供支持(图1)。

WLEM模型旨在实现黑河流域农业生产过程的资源利用效率与产出的经济效益协同提升,具体体现在生产成本最小化和零利润的假设条件下,使农业生产所需水土自然资源与其他资源投入的经济成本最小化。同时满足流域尺度作物与农产品整体需求,将流域尺度的作物生产分配至资源禀赋和生产效率较高的空间栅格单元,有效实现水土自然要素与经济关联分析。在部门均衡经济理论下,首先,通过生产函数和消费效用函数等刻画农业生产行为的嵌套框架结构(图2),搭建流域尺度农业部门均衡分析“水-土-经济”模型框架;其次,计算制备模型所需的投入产出数据、作物空间分布数据与行为参数等,为模型提供数据支撑;最后,利用GEMPACK经济建模软件,求解模型中多个生产函数和消费效用函数方程所组成的大型非线性等式系统,完成模型量化过程,并基于此进行农业生产的情景模拟与政策评估。模型主要包括供给模块、需求模块和市场均衡模块。其中,需求模块共涉及粮食产业、畜牧业、加工食品业三个产业部门;供给模块中要素投入包括土地要素(水资

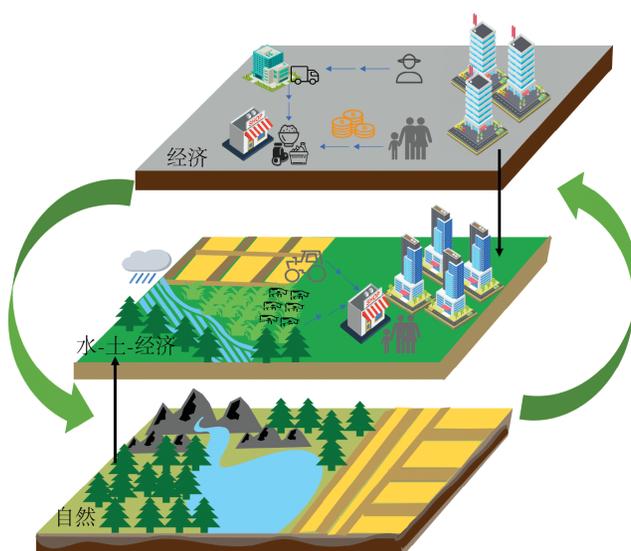


图1 农业水-土-经济耦合模型模拟示意图

Figure 1 Schematic diagram of agricultural water-land-economic nexus model

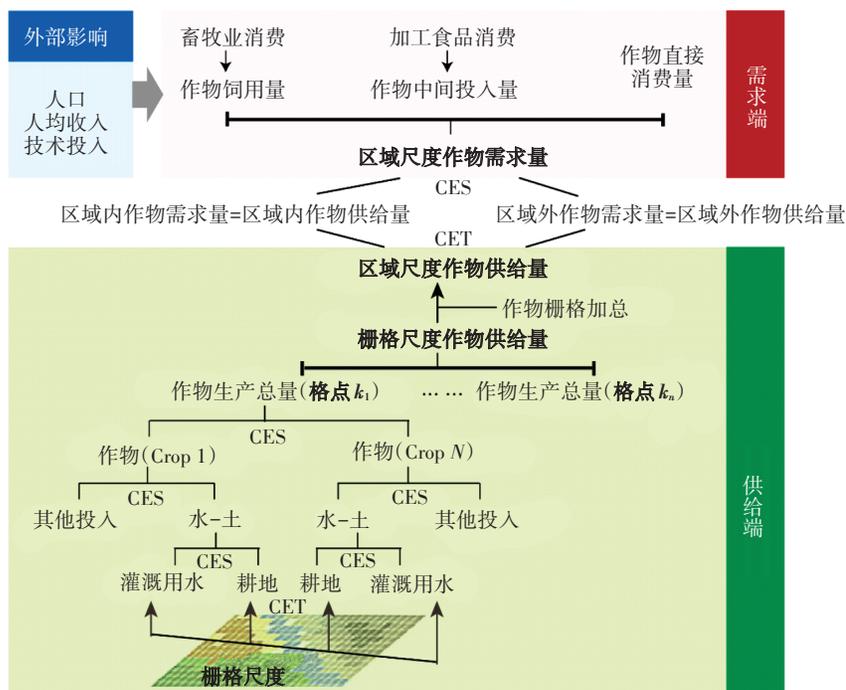


图2 WLEM模型框架图

Figure 2 Framework diagram of WLEM model

源和土地资源)和非土地要素(机械、劳动力和化肥等其他非自然要素投入);市场均衡模块指作物需求等于供给,反映作物在生产、消费、贸易和价格等方面的互动关系。WLEM模型为流域尺度粮食安全的水土资源优化配置、农业政策的资源经济效应,以及精准和集约化农业管理研究提供了定量化工具。

区域内外农产品的贸易、消费及中间投入加工需求影响模型自上而下的均衡闭合。WLEM模型的农产品总消费包括粮食直接消费量、畜产品需求和食品加工的消费量(图2)。模型假设农产品价格和人均收入为农产品消费变化的主要驱动因素。随着收入增加,消费者膳食结构从以粮食消费为主转向肉蛋消费增长的趋势,因此,收入水平的提升对长期消费模式的影响极为重要。具体对人均消费量的影响程度主要由线性回归估算的价格弹性和收入弹性来调节,由此刻画消费者对于粮食价格变化的反应能力,以及较高收入下对畜牧产品和加工食品的消费变动程度的行为(公式1)。模型使用简化形式的需求函数,可将其视为消费需求系统的局部近似,该模型仅计算居民食物消费量。

$$D_{f,r} = \varepsilon_{f,r} \times P_{f,r} + \sigma_{f,r} \times y_r + POP_r \quad (1)$$

式中: D 为区域食物总需求; r 指区域; POP 是总人口; P 是商品价格; y 是人均收入; σ 是产品 f 的收入弹性; ε 是需求价格弹性。

嵌入栅格尺度上水土资源禀赋的农产品生产过程刻画是模型自下而上加总闭合的基础(图2)。生产投入要素除种子外,有水、土资源要素投入,还有劳动力、资本等其他要素投入。区域农作物供应能力是区域栅格层面作物生产的总和,栅格尺度可利用的水土资源要素禀赋导致农产品产出不同。技术投入使得生产过程中的作物投入和非作物投入之间存在相应的替代关系,提高农作物在高附加值产品中的生产投入效率将对耕地需求产生重要影响。生产模块采用多层嵌套的CES(Constant elasticity of substitution)生产函数结构,其中各作物生产投入主要包括劳动力、资本等非水土资源投入(公式2)和水土资源投入(公式3),两者存在替代关系。由于不同位置的土地价格(租金)不同,土地供给弹性存在差异。同时,考虑到水土资源耦合对农业生产力的影响,模型纳入水土资源替代弹性。模型中对非土地投入不进行详细分类,依据农产品收益资料汇编数据,将除去土地(包括水价)后的其他人力和化肥作为非土地投入价值量。

$$Q_g^{NLW} + \alpha_{NLW} = X_0 - a_0 - \varphi (P_g^{NLW} - \alpha_{NLW} - P_0 - a_0) \quad (2)$$

$$Q_g^{LW} + \alpha_{LW} = X_0 - a_0 - \varphi (P_g^{LW} - \alpha_{LW} - P_0 - a_0) \quad (3)$$

式中: Q_g^{NLW} 为非水土资源投入; Q_g^{LW} 为水土资源投入; X_0 为作物产出; P_0 为作物价格; a_0 指作物生产率变动; α_{NLW} 指非水土资源生产率变动; α_{LW} 指水土资源生产率变动; P_g^{NLW} 和 P_g^{LW} 是非水土价格变动百分比和水土价

格变动百分比; φ 是水土资源投入与非水土资源投入之间的替代弹性。

模型微观尺度上以遥感解译的栅格尺度上的作物种植面积为现状,假设作物生产不受水资源约束,仅考虑土地资源的分配,参与作物生产的格网内会有可用水资源,作物竞争调整即各作物所占栅格土地面积。基于网格单元中土地所有者预期利润最大化目标,采用常转换弹性(CET, Constant Elasticity of Transformation)加总函数分析土地供应对价格变化的响应(公式4和公式5),即土地数量一定的前提下,格点上多作物土地分配量由作物土地租金变化决定^[11]。此外,各部门中不同作物的投入之间也存在替代关系,模型对畜牧产品和加工食品设置增加值嵌套结构,表示部门产出与中间投入和初级投入之间的关系。

$$Q_T = K \times \left(\sum_{i \in I} \beta_i \times Q_i^{\rho_i} \right)^{\frac{1}{\rho_i}} \quad (4)$$

$$P_i \times Q_i / (P_T \times Q_T) = \beta_i \times Q_i^{\rho_i} / \sum_{j \in I} \beta_j \times Q_j^{\rho_j} \quad (5)$$

式中: Q_T 为总的耕地投入; Q_i 是作物*i*的耕地投入; ρ_i 指由土地弹性决定的指数($\sigma = \frac{1}{1-\rho}$ 是土地利用转换弹性); K 和 β_i 分别指比例系数和作物*i*的耕地所占份额; P_T 是总的耕地租金; P_i 是作物*i*的耕地租金; i 和*j*是作物类型集合。

WLEM模型供需均衡假设农产品市场贸易部分依赖于均质商品的假设,同行业本地商品和进口商品价格没有差别,两个区域之间的价格差异主要由运输成本造成。如果区域价格的差异大于区域间运输货物的成本,则将发生贸易,且价格差将被压低至运输成本。对于农产品贸易的刻画主要包括同质产品假设和不完全替代假设两种。同质产品假设是将运输成本和关税考虑在内时假设相同行业的本地商品和进口商品价格是一致的,同一行业中的两种商品互相之间具有完全的替代性。这导致市场上一种商品只有唯一价格,并且不同区域之间没有行业内贸易。流域尺度多区域投入产出表为刻画流域内外农产品流动提供了基准。贸易市场将供给侧与需求端相连接,在作物供给量与需求量相等的假设前提下得到市场均衡价格。此外,在局部均衡理论假设前提下,不同作物在区域尺度上实现单个作物的局部均衡,如玉米在本地市场的供需均衡。

WLEM模型以经济和水土资源的基准网格数据和投入产出数据来描述区域初始的作物生产与农业经济均衡状态。受数据限制主要刻画了区域大麦、

小麦、玉米(包括籽粒玉米和青贮玉米)和油菜4种主要作物。作物空间分布数据来自于国家自然科学基金黑河流域生态-水文重大研究计划项目数据共享中心。基准网格数据包括作物产量、水资源消耗和灌溉土地面积以及其他综合投入的价值和数量,主要根据2012年甘肃省农产品成本收益统计年鉴中农作物亩(667 m²)产成本投入计算。为刻画栅格尺度内作物竞争,研究模型网格空间分辨率定义为900 m×900 m,单个栅格中包含多种作物。依据国家自然科学基金黑河流域生态-水文重大研究计划项目数据共享中心编制的2012年黑河流域投入产出表,获取农产品直接、间接消费和区域贸易信息。

流域尺度上的农作物生产要在土地和灌溉可用水量的限制下,通过调整各种作物要素投入改变作物播种面积,以实现总收益最大化。因此优化配置过程中涉及到弹性与份额参数估算(表1),旨在刻画不同资源要素间的竞争关系,以及资源供给禀赋与农业经济系统作物竞争的资源消耗关系。弹性参数主要采用计量经济方法或其他文献研究结果来外生确定。其中,收入弹性和价格弹性估算方法参考MUHAMMAD等^[26]提出的Florida-Preference Independence (PI)模型和Florida-Slutsky模型,谷物、畜产品和加工食品价格弹性分别为-0.389、-0.564、-0.839,收入弹性分别为0.531、0.768、1.144。参考HAQIQI^[27]的研究,在模型中将水资源供给弹性设为0.48。土地供给弹性主要参考刘宇等^[28]对张掖市的土地供给弹性设定为0.5。水土替代弹性参考LI等^[29]在黑河流域的研究,靠近黑河流域的中心灌区的水土替代弹性约为0.9,而相比远离流域水源的边缘灌区的替代弹性值则小于0.25。水土与非水土替代弹性主要根据GTAP V.6数据库和2001年经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)报告^[30]设定为0.5,由国家尺度数据代替黑河流域数据。土地转换弹性主要依据WENG等^[31]和FUJIMORI等^[32]研究结果设定为1.75。成本份额参数主要基于黑河流域农作物灌溉用水量和水价进行估算,土地资源成本份额根据各县级尺度土地租金和耕地面积进行估算。数据来源于2012年和2017年全国农产品成本收益资料汇编以及甘肃省统计年鉴。

2 黑河流域“粮改饲”情景政策模拟

2.1 研究区域

绿洲农业在中国西北干旱区的经济发展中具有

表1 WLEM模型中的主要参数及其来源

Table 1 Main parameters and their sources in the WLEM model

参数 Parameter	尺度 Scale	估计(计算)方法 Estimation(calculation) method	参考来源 Reference
收入弹性	国家尺度	最小二乘法	[26]
价格弹性	国家尺度	最小二乘法	[26]
水资源供给弹性	黑河流域尺度	计量经济分析法	[27]
土地供给弹性	黑河流域尺度	计量经济分析法	[28]
水土替代弹性	流域县级尺度	计量经济分析法	[29]
水土与非水土替代弹性	国家尺度	GTAP	[30]
土地转换弹性	国家尺度	计量经济分析法	[31-32]
土地成本份额	黑河流域尺度	根据地租和土地面积计算	本研究
水资源成本份额	黑河流域尺度	根据水价和灌溉用水计算	本研究
作物饲料与非饲料替代弹性	国家尺度	GTAP	[30]

举足轻重的作用,水-生态-经济协同发展是绿洲农业可持续的关键,农业系统的健康发展很大程度上决定了干旱地区的总体发展态势^[33]。鉴于干旱区水资源约束和土地资源充沛的现状,开展流域农业系统可持续发展集成研究,将为我国内陆河流域可持续发展提供科学支撑。

黑河干流主要发源于青海省祁连山,流经甘肃省河西走廊绿洲,流入内蒙古高原的居延海(图3)。流域上、中、下游年均降水量分别约为350、140、47 mm,地表水是黑河流域生态环境演变的关键控制因子^[34]。上游地区地形以丘陵冰川为主;中游地区由平原组成,以灌溉农业为主,是我国西北干旱区重要的粮食生产基地,农业用水占全流域用水的83%,同时高耗水作物(如玉米、小麦等^[35])种植比例较大(图4);下游地区主要是沙漠和湖泊。

2.2 “粮改饲”政策

2015年中央一号文件提出加快发展草牧业,支持青贮玉米等饲草料种植,开展“粮改饲”和种养结合试点工作,促进粮食、经济作物、饲草料三元种植结构协调发展。青贮玉米是采用青贮技术专门将青茎叶作为饲料的玉米,同籽粒玉米相比,青贮玉米栽培容易,一年可种植收割多次,是用于牛、羊等反刍动物养殖的核心饲料。2016年和2017年中央一号文件相继提出推进和扩大“粮改饲”试点的要求,“粮改饲”政策也成为我国农业供给侧结构性改革的重要内容。为推进“粮改饲”工作,2015年农业部在甘肃和青海等10个省(区)积极开展“粮改饲”试点工作,以期通过补贴方式鼓励农民种植饲草作物,同时减少籽粒玉米种植面积。由于贮藏加工技术是青贮玉米用作饲料过程中的重要环节,其实施的补贴政策主要通过饲草

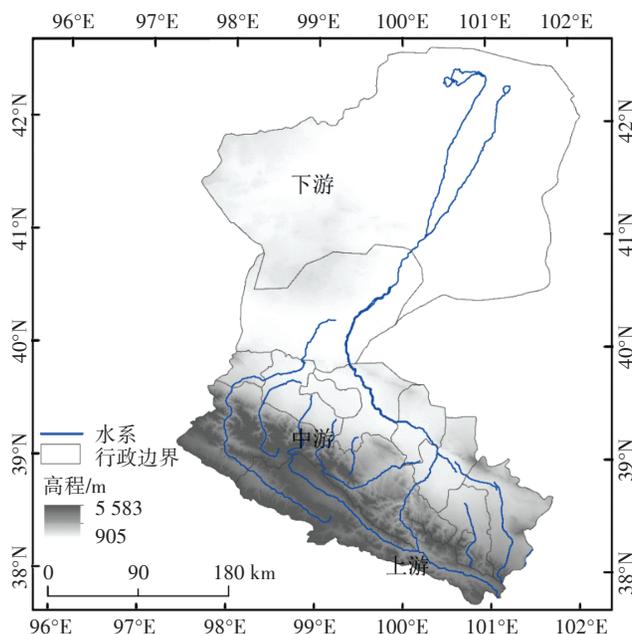


图3 研究区域地理位置

Figure 3 Location of the research area

加工环节进行补贴,对种植环节大型农业机械设备的补贴政策相对较缺乏。因此,本研究主要模拟种植与加工两个环节的农业机械设备补贴,对比其政策效果,为“粮改饲”补贴政策推行提供参考。

2.3 情景设计

本研究模拟设定的基准情景刻画了现有农业经济发展外部环境变化情况,即模拟按照历史发展趋势的人口增加和收入提升情况下农产品消费与生产变化,并在基准情景上设计了三种不同的农业机械设备补贴(表2)。结合黑河流域各县(市)青贮玉米收获面积和玉米空间分布对青贮玉米空间分布提出假设。由于该模型的基础为静态局部均衡,模拟以2012年为基期的不同情景的影响冲击,模型的基础数据是

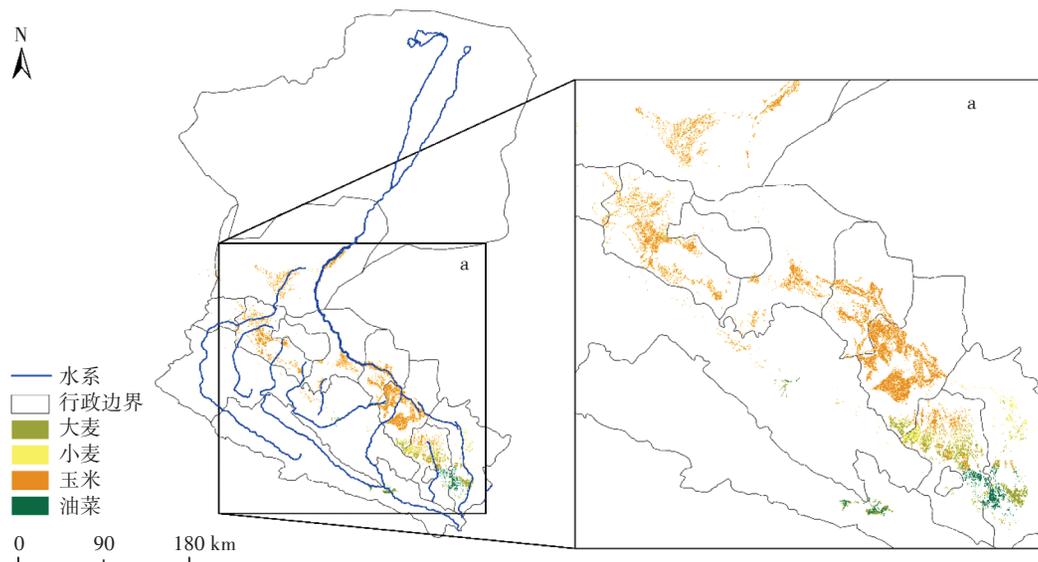


图4 2012年黑河流域主要农作物分布

Figure 4 Distribution of major crops in Heihe River in 2012

2012年黑河流域的投入产出表,而模型设定的基准时期是2019年。因此,本研究按照2019年流域经济、人口、人均收入、技术水平进行了数据更新。根据甘肃省、青海省2019年统计年鉴数据,2019年黑河流域人口共增加0.03%,人均可支配收入提升47.3%,作物生产技术水平增加0.02%。黑河流域青贮玉米种植机械补贴或饲料加工技术补贴变动比例来自《2012年农机购置补贴实施指导意见》和《2018—2020年农机购置补贴实施指导意见》,其中青贮玉米种植机械购置补贴最高额度由12万元增加至15万元,饲料(草)加工机械设备补贴比例按规定在30%上下浮动,为比较不同政策效果设定两项补贴同增长25%。

3 模拟结果

“粮改饲”补贴政策影响农业经济的路径主要有两方面:一方面,补贴青贮玉米种植和加工两个环节农机设备投入以期降低劳动力投入从而降低生产成本,拉动青贮玉米产量作为饲料的生产规模,并适度减少玉米种植面积;另一方面,农产品消费需求增加将带动全要素投入增加,将改变水土资源消耗的现状

表2 情景设计

Table 2 Scenario design

情景 Scenario	具体设置 Design
基准情景	人口增加0.03%;人均可支配收入增加47.3%
补贴政策一	基准情景下,青贮玉米种植环节农机购置补贴增加25%
补贴政策二	基准情景下,青贮玉米加工环节农机设备补贴增加25%
叠加补贴政策	基准情景下,同时增加补贴25%

空间格局。因此,本研究从作物产量和投入要素变动两个方面进行政策效果分析。

3.1 “粮改饲”补贴政策对作物产量的影响

从基准情景(人口和人均收入增加)的模拟结果中看出,人口增加拉动各部门消费上升,而人均可支配收入的增加,使人们更倾向于消费营养含量高的畜牧产品和加工食品,直接粮食消费量随着收入的增加而下降(图5)。模拟显示,直接玉米消费下降9.07%,畜产品增加4.11%,食品加工业增加3.58%。

随着人口增长农产品消费需求增加,作为直接与中间投入的作物产量也随之改变,青贮玉米消耗需求同玉米相比增幅较大(图5)。结果表明,玉米产量提高了1.37%。从三个影响因素来看,玉米的直接消费占比较小,人口膳食结构改变和收入增加带来的玉米直接消费量降幅并未超过其他部门的玉米消费需求增幅,进而导致玉米的总产量上升。青贮玉米产量提高2.03%,究其原因,畜产品需求量的上升将提高畜产品的价格,刺激生产肉蛋奶产品的畜牧产业扩大生产规模,饲料需求增加将拉动饲料作物投入量。此外,青贮玉米饲料的投入将增加2.03%,而玉米饲料投入增加2.42%。存在差异的主要原因是玉米生产价格提高1.06%,而青贮玉米生产价格提高1.70%。

青贮玉米相比于玉米作为饲料的投入更小,若加大机械化水平,仍能进一步降低青贮玉米的生产投入。本研究中“粮改饲”政策主要设计了青贮玉米种植和加工两个环节提供机械设备补贴的情景。结果

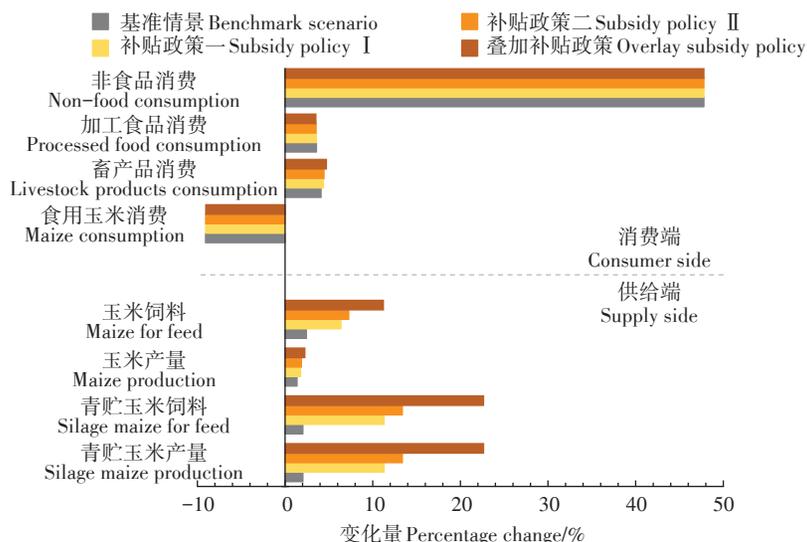


图5 不同情景下各部门消费、作物产量及饲料投入变化

Figure 5 Changes in consumption, crop production and feed inputs by sector under different scenarios

显示,补贴政策一(种植环节)青贮玉米作为饲料投入量增加 11.31%,补贴政策二(加工环节)青贮玉米作为饲料投入量增加 13.37%,叠加补贴政策则将增加 22.65%(图5)。对种植环节的大型农业机械补贴降低了生产主体对该要素的资本投入,降低了生产成本。然而,对饲草的加工环节进行补贴,将直接影响作物饲料价格,与种植环节相比对青贮玉米产量拉动作用较大。两项补贴同时实施发生了政策叠加效应,青贮玉米产量出现大幅增长。随着青贮玉米供给增加,为达到模型均衡假设条件,肉蛋奶产品需求量相应增加,带动玉米产量小幅增长。

3.2 “粮改饲”补贴政策对水土资源要素投入的影响

在粮食与饲料两大需求拉动下,水与土地资源等要素投入也将随之改变。基准情景结果(图6)显示,人口和人均收入增加后,青贮玉米和玉米需求量上升,拉动了青贮玉米种植的水和土地资源投入增加 1.27% 和 1.60%,而非水土资源投入增加 2.14%。玉米种植的水和土地资源投入分别增加 0.84% 和 0.41%,而非水土资源投入增加 1.40%。两者中情景导致的要素投入上涨幅度不同有两个方面的原因:一方面是玉米直接消费的减少,相比于青贮玉米,籽粒玉米价格过高导致玉米整体需求增长量下滑,而肉蛋

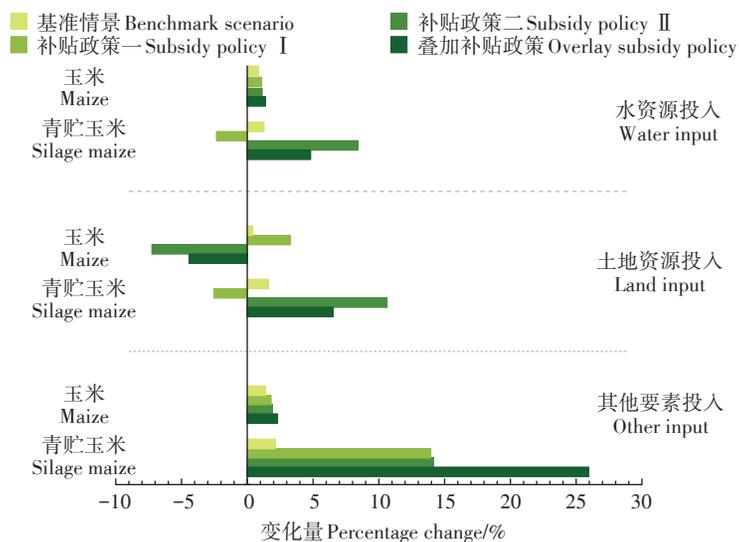


图6 不同情景下要素投入变化

Figure 6 Variation of factor inputs under different scenarios

奶产品需求的增加使青贮玉米的需求量提升,导致玉米供给与青贮玉米相比涨幅略低;另一方面,青贮玉米土地收益更高,将有更多土地资源投入其中,种植规模的扩大会导致用水需求增加。

水土资源是农业生产的基础资料,补贴政策在推动产量提高的同时应关注水土资源的承载力。模拟结果表明,补贴政策一(种植环节)通过提高机械设备投入增加了青贮玉米非水土要素投入,增幅为13.94%,而水土资源投入量占比分别减少了2.34%和2.51%。补贴政策二(加工环节)与补贴政策一相比,青贮玉米产量提高2.06%,但大幅度拉动了全要素投入,主要原因是该项补贴政策并未侧重于种植环节的要害投入,因此为提高产量而提升了投入要素的需求。但加工环节补贴对玉米种植面积调减作用显著,玉米种植的土地资源投入量下降7.24%。青贮玉米和籽粒玉米在畜产品投入中的竞争关系使两种作物土地种植面积出现此消彼长的状况。青贮玉米收益提升拉动了其种植土地收益的增加,由此带动青贮玉米土地种植面积的增加和籽粒玉米种植面积的下降。叠加补贴政策的青贮玉米产量在单项补贴的基础上均有大幅提升,且水土资源消耗量同补贴政策二相比略有下降。

基于水土资源承载力差异开展种植结构调整,是进一步提升流域水土资源生产力的精细化管理措施。本研究模拟了三种情景下水资源和土地利用变化,以获取每种作物的最佳空间分布和用水消耗量,反映不同的资源可用性和限制因素。影响水土资源消耗空间变动的主要原因有两个方面:一是格网内水土资源要素占总投入成本份额较高,生产过程中需要更多该要素投入,变动幅度更大;二是受水土资源供给弹性和水土资源替代弹性影响,弹性参数表明了农业生产中单一资源的不可替代性和稀缺性程度,供给弹性较大的地区变化幅度较高。结果(图7、图8)显示,补贴政策一中黑河中游高台县和临泽县青贮玉米水土资源投入增加幅度较大,而中游酒泉市、嘉峪关市、金塔县等地呈下降趋势。主要原因是该政策主要针对种植环节进行补贴,一定程度上弥补了因水资源供给匮乏而限制农业生产规模的缺陷。肃南裕固族自治县、酒泉市、嘉峪关市、金塔县、民乐县以及山丹县为边缘灌区,水土资源是该类地区农业生产不可或缺的元素,也是稀缺资源。水资源稀缺区为实现生产成本的最小化,需提高此类区域的种植环节技术补贴,从而降低水土资源投入在生产要素投入中的占比。而高

台县、临泽县和张掖市所在区域位于黑河流域中游灌区,经济相对发达,产业用水竞争力相对较高,因此,同其他地区相比,自然资源禀赋可支撑其对水土资源投入的增加。补贴政策二中黑河流域中上游的民乐县和山丹县、中下游的金塔县和酒泉市水土资源生产投入均有提升,而张掖市和临泽县投入下降。究其原因,此类补贴政策主要针对青贮玉米种植环节后的加工环节,为鼓励青贮玉米种植,金塔县等地主要通过增加自然资源投入的方式扩大生产规模,以获取后续加工环节补贴。而张掖市等地处于经济发达地区,该类区域劳动力成本较高,产业竞争促使该区域水土资源生产力提高,进而使机械化以及节水技术推广相对顺利。因此,应重视经济发达地区青贮玉米加工环节补贴政策的实施,以提高青贮玉米产量、减少水土资源的大量投入。

4 讨论

本研究基于栅格尺度的水、土、农业的空间数据构建农业部门均衡分析模型,以黑河流域“粮改饲”补贴政策为例,探索“水-土-经济”耦合机制与效应模拟,定量分析了农业生产中资源消耗和经济产出。本研究模拟了国家“粮改饲”补贴政策的效应,通过不同环节的补贴鼓励农民种植青贮玉米等饲草作物,同时减少籽粒玉米种植面积,合理配置水土资源,实现农业经济产出效益提升。

WLEM模型基于生产要素空间异质性特征,将流域尺度的作物生产分配至资源禀赋和生产效率较高的空间栅格单元,满足流域尺度作物与农产品整体需求,以跨尺度嵌套结构提高宏观农业可持续发展模型在数据尺度上的准确性。本研究假设流域水资源供给量与作物灌溉用水消耗量相同,因而在水文与水资源供给研究方面存在欠缺。今后的研究将衔接水文模型分析水资源供给变化造成的系统影响,以提供更精准的参考。

5 结论

(1)与种植环节补贴相比,在加工环节进行农机补贴对青贮玉米产量的拉动作用较大。种植与加工环节叠加式补贴有助于鼓励青贮玉米生产,同时一定程度减少籽粒玉米种植面积,符合“粮改饲”政策目标。

(2)为推动“粮改饲”政策的实施,应重视加工环节的农业机械设备补贴,并完善种植环节与加工环节两种补贴政策的优势互补机制。

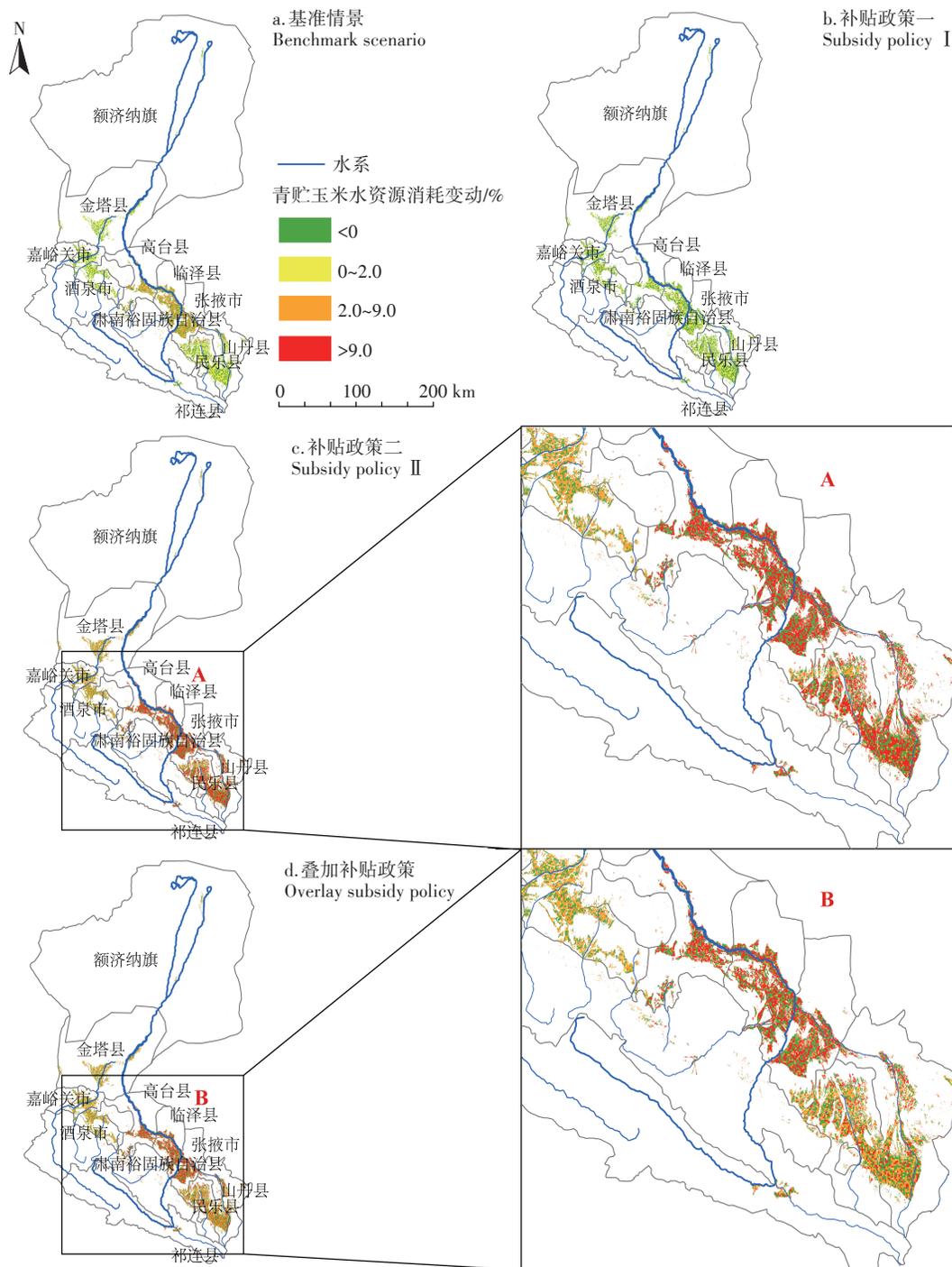


图7 不同情景下青贮玉米的水资源消耗变动空间分布

Figure 7 Spatial distribution of water consumption variation for silage maize under different scenarios

(3)建议在流域水资源缺乏地区实施种植环节补贴政策,在经济相对发达地区实施加工环节补贴政策,以提高政策的指向性和精准性。

参考文献:

[1] DAS A, SAHOO B, PANDA S N. Evaluation of nexus-sustainability and conventional approaches for optimal water-energy-land-crop plan-

ning in an irrigated canal command[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(8):2329-2351.

[2] LIU J, HULL V, GODFRAY H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(9):466-476.

[3] AN P, REN W, LIU X, et al. Adjustment and optimization of the cropping systems under water constraint[J]. *Sustainability*, 2016, 8(12):1207.

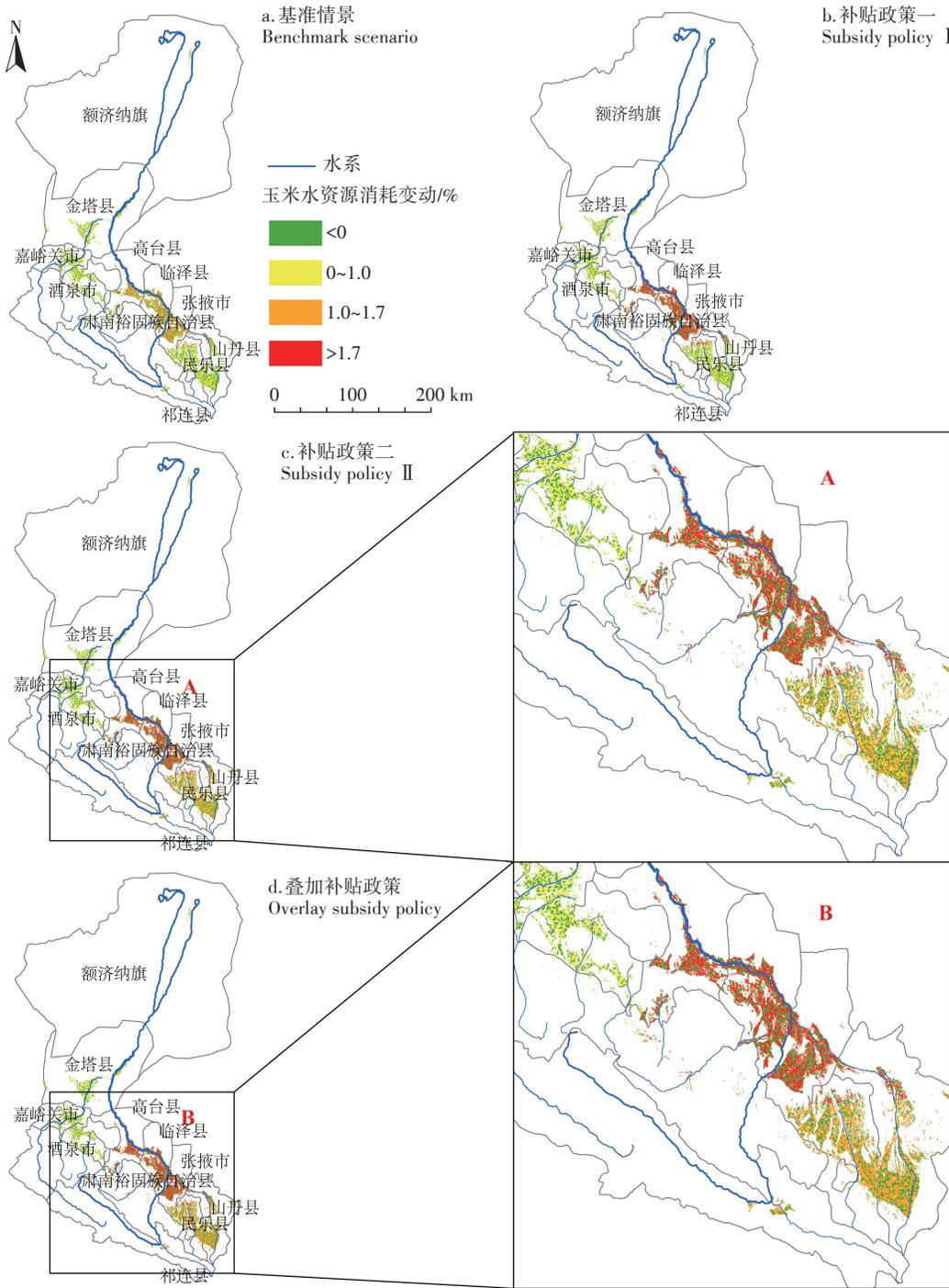


图8 不同情景下玉米的水资源消耗变动空间分布

Figure 8 Spatial distribution of water consumption variation for maize under different scenarios

[4] SUN J, LI Y P, SUO C, et al. Impacts of irrigation efficiency on agricultural water-land nexus system management under multiple uncertainties: A case study in Amu Darya River basin, central Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216:76-88.

[5] 王浩, 胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题[J]. 水利学报, 2020, 51(9):1009-1014. WANG H, HU P. Key issues of ecological conservation in the Yellow River basin from a water cycle perspective[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9):1009-

1014.

[6] BRAAT L C, VAN LIEROP W F J. Economic-ecological modeling: An introduction to methods and applications[J]. *Ecological Modelling*, 1986, 31(1/2/3/4):33-44.

[7] 高群. 国外生态-经济系统整合模型研究进展[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3):375-384. GAO Q. Overview on ecological-economic integration model research[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3):375-384.

- [8] RINGLER C, BHADURI A, LAW FORD R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6):617-624.
- [9] DAVIS K F, RULLI M C, SEVESO A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(12):919-924.
- [10] BRAUMAN K A, SIEBERT S, FOLEY J A. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security: A global analysis[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2):024030.
- [11] TIMILSINA G R, BEGHIN J C, VAN DER MENSBRUGGHE D, et al. The impacts of biofuels targets on land-use change and food supply: A global CGE assessment[J]. *Agricultural Economics*, 2012, 43(3):315-332.
- [12] JOHNSON N, BUREK P, BYERS E, et al. Integrated solutions for the water-energy-land nexus: Are global models rising to the challenge? [J]. *Water*, 2019, 11(11):2223.
- [13] WEINDL I, BODIRSKY B L, ROLINSKI S, et al. Livestock production and the water challenge of future food supply: Implications of agricultural management and dietary choices[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 47:121-132.
- [14] VALIN H, HAVLÍK P, FORSELL N, et al. Description of the GLOBIOM (IIASA) model and comparison with the MIRAGE-BioF (IFPRI) model[R/OL]. (2013-10-30)[2021-02-23]. http://globiom-iluc.eu/wp-content/uploads/2014/02/Describing-GLOBIOM-and-comparison-with-MIRAGE-BioF_October-2013.pdf.
- [15] ROBINSON S, MASON-D' CROZ D, ISLAM S, et al. The international model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): Model description for version 3[R]. Washington DC: International Food Policy Research Institute, 2015.
- [16] BALDOS U L C, HAQIQI I, HERTEL T W, et al. SIMPLE-G: A multiscale framework for integration of economic and biophysical determinants of sustainability[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 133:104805.
- [17] SCHMITZ C, LOTZE-CAMPEN H, GERTEN D, et al. Blue water scarcity and the economic impacts of future agricultural trade and demand[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6):3601-3617.
- [18] DE FRAITURE C, WICHELNS D. Satisfying future water demands for agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4):502-511.
- [19] STEVANOVIĆ M, POPP A, LOTZE-CAMPEN H, et al. The impact of high-end climate change on agricultural welfare[J]. *Science Advances*, 2016, 2(8):e1501452.
- [20] JALAVA M, GUILLAUME J H A, KUMMU M, et al. Diet change and food loss reduction: What is their combined impact on global water use and scarcity? [J]. *Earth's Future*, 2016, 4(3):62-78.
- [21] PHILIPPIDIS G, HELMING J, TABEAU A. Model linkage between CAPRI and MAGNET: An exploratory assessment[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
- [22] WLOTJER G B, KUIPER M, AVALLARI A, et al. The MAGNET model: Module description[R]. Hague: LEI Wageningen UR, 2014.
- [23] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 黑河中上游地区2000—2010年土地利用变化及水土保持服务功能[J]. *生态学报*, 2014, 34(23):7013-7025. LIU J W, JIN T T, LIU G H, et al. Changes in land use and soil and water conservation of the upper and middle reaches of Heihe River basin during 2000—2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23):7013-7025.
- [24] BALDOS U L C, HERTEL T W. Global food security in 2050: The role of agricultural productivity and climate change[J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2014, 58(4):554-570.
- [25] HERTEL T W, BALDOS U L C. Global change and the challenges of sustainably feeding a growing planet[M]. New York: Springer International Publishing, 2016.
- [26] MUHAMMAD A, SEALE J L, MEADE B, et al. International evidence on food consumption patterns: An update using 2005 international comparison program data[J]. *USDA-ERS Technical Bulletin*, 2011, 1929:59.
- [27] HAQIQI I. Irrigation, water scarcity, and adaptation[D]. West Lafayette: Purdue University, 2019:53-74.
- [28] 刘宇, 王宇, 周梅芳, 等. 张掖市水价改革的定量研究——基于引入水土账户的CGE模型[J]. *资源科学*, 2016, 38(10):1901-1912. LIU Y, WANG Y, ZHOU M F, et al. The impact of Zhangye's water price reform on the economy and water saving using Water-Land CGE model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(10):1901-1912.
- [29] LI X, ZHANG Q, LIU Y, et al. Modeling social-economic water cycling and the water-land nexus: A framework and an application[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 390:40-50.
- [30] KEENEY R, HERTEL T. GTAP-AGR: A framework for assessing the implications of multilateral changes in agricultural policies[R]. West Lafayette: Purdue University, 2005.
- [31] WENG Y, CHANG S, CAI W, et al. Exploring the impacts of biofuel expansion on land use change and food security based on a land explicit CGE model: A case study of China[J]. *Applied Energy*, 2019, 236:514-525.
- [32] FUJIMORI S, HASEGAWA T, MASUI T, et al. Land use representation in a global CGE model for long-term simulation: CET vs. logit functions[J]. *Food Security*, 2014, 6(5):685-699.
- [33] LIU Y S, LIU Y, GUO L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4):905-910.
- [34] 宁宝英, 何元庆, 和献中, 等. 黑河流域水资源研究进展[J]. *中国沙漠*, 2008(6):1180-1185. NING B Y, HE Y Q, HE X Z, et al. Advances on water resources research in Heihe River basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2008(6):1180-1185.
- [35] 郑璐倩, 谈明洪. 黑河中游地区作物用水效率比较及种植结构调整方向研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(7):977-986. ZHENG L Q, TAN M H. A comparative study of water use efficiency of different crops in the middle reaches of Heihe River and its implications for planting structure adjustment[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(7):977-986.