

# 东北典型黑土区耕地轮作休耕的空间重构

宋 戈<sup>1,2</sup>, 张红梅<sup>3</sup>

(1. 东北大学文法学院, 沈阳 110169; 2. 辽宁省自然资源厅土地保护与利用重点实验室, 沈阳 110169;  
3. 辽宁大学公共管理学院, 沈阳 110136)

**摘要:** 轮作休耕是保障黑土区耕地资源可持续利用的重要手段。科学合理确定粮食作物轮作休耕的耕地利用规模及空间分布, 对实现黑土区耕地休养生息、提升地力和平衡粮食供求结构具有重要意义。以东北典型黑土区——克山县、拜泉县和依安县为研究区, 运用作物种植空间适宜性评价模型、多目标优化(MOP)模型和智能体土地布局优化配置(AgentLA)模型, 基于地块尺度构建耕地轮作和休耕布局, 适度调整轮作休耕规模及分布。结果发现: (1) 研究区主要作物种植适宜性高值和低值区存在明显空间差异。玉米和大豆种植适宜性高值区交汇于依安县北部和克山县西部, 是玉米—大豆轮作优势区域。主要作物种植适宜性低值区交汇于依安县南部和拜泉县西南部, 是休耕的重点区域。(2) 基于种植结构优化的轮作规模实现了大豆种植比例增加和玉米种植比例减少, 缓解了目前玉米阶段性供大于求、大豆供给不足的现实矛盾。通过设定多种粮食供求情景确定休耕规模有利于灵活应对粮食市场变动。(3) 兼顾耕地空间适宜性和集聚性的轮作休耕布局有利于充分利用耕地资源禀赋比较优势、发展规模化经营, 对提高耕地利用效率具有重要作用。研究通过科学重构黑土区耕地轮作和休耕空间布局, 实现了耕地空间适宜性、空间集聚性、种植结构合理性和粮食供求稳定性的同步提升, 为实现黑土区耕地资源合理可持续利用和粮食安全提供政策参考。

**关键词:** 耕地可持续利用; 轮作休耕; 空间重构; 粮食安全; 东北典型黑土区

轮作休耕是实现国家粮食安全和黑土地保护重大战略目标的重要途径之一, 可有效改善土壤环境、提升地力、提高农产品品质, 其规模管控、空间布局及模式选择需考虑自然环境、社会经济发展状况和粮食市场等多种因素。科学构建轮作休耕布局对提升黑土区耕地综合生产能力和可持续利用能力, 调整粮食种植结构具有重要作用<sup>[1,2]</sup>。2016年以来, 在黑土地保护和种植业结构调整政策引导下, 东北地区耕地轮作休耕试点工作积极推进。但实践中对轮作休耕规模及空间选择均缺乏科学依据, 地方政府在下达轮作休耕指标任务时往往忽略了区域自然资源禀赋、社会经济和粮食供需差异等实际情况, 导致不同作物适宜性种植空间的错配, 休耕轮作布局分散, 种植规模不合理和种植结构再度失衡等问题, 引发粮食供求结构性矛盾, 严重影响黑土区耕地资源的可持续利用。耕地轮作休耕空间亟待重构。目前, 耕地轮作休耕问题已引起学术界的广泛关注, 研究区域主要集中在生态退化区、连作障碍区、重金属污染区和地下水漏斗区等<sup>[3,4]</sup>, 其中耕地轮作研究以问题对策型的定性分析为主, 耕地休耕研究主要围绕休耕的技术及管护模

收稿日期: 2021-10-25; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971247, 41571165); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA096)

作者简介: 宋戈(1969-), 女, 黑龙江庆安人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用与管理。

E-mail: songgelaoshi@163.com

通讯作者: 张红梅(1992-), 女, 黑龙江阿城人, 博士, 讲师, 研究方向为土地利用与管理。

E-mail: 18640553575@163.com

式、影响机制、制度成效、行为意愿及补偿标准等方面展开<sup>[2,5-7]</sup>。以自然条件为约束,重点考虑粮食自给率、水资源含量、水土流失、成本收益等指标测算区域休耕规模<sup>[8,9]</sup>,通过分析土壤污染、耕地质量、生态系统脆弱性、耕地利用强度和经济发展水平<sup>[10,11]</sup>等,采用多指标综合评价法和多种空间统计分析法划定休耕区域。现有研究对不同作物的耕地利用空间关系及种植结构考虑不够,尺度多较为宏观,地块尺度的耕地轮作与休耕布局研究有待进一步深入。总之,改变现有“任务+指标”式轮作休耕布局的路径依赖,耦合耕地利用的各类自然和社会经济要素,兼顾耕地空间适宜性、集聚性和种植结构合理性,采用科学方法重构黑土区轮作休耕的数量规模和空间布局,对实现黑土区耕地资源可持续利用和平衡粮食供求结构至关重要。

作物种植是耕地最直接的利用方式<sup>[12]</sup>,合理的耕地轮作休耕布局应综合考虑不同作物种植空间适宜性和种植规模适度性。从黑土区耕地资源利用与保护实施管理效率角度,轮作休耕布局应提升空间集聚性,而目前大多数休耕轮作在空间选择上并未兼顾作物种植的空间适宜性与空间集聚性,规模上尚未关注作物种植结构和粮食供求问题,需进一步深入和细化。东北黑土区具有世界最为珍贵的黑土资源,是我国最大的商品粮基地,对保障国家粮食安全具有不可替代的战略性地位。本文以东北黑土区典型区域克山县、拜泉县和依安县为研究区,以主要作物种植的空间适宜性为依据,重构耕地轮作和休耕空间。通过构建种植结构多目标优化模型、设定不同粮食供求情景确定轮作和休耕规模,并兼顾耕地利用与保护的空间效率,进而重构地块尺度下耕地轮作和休耕的合理规模和空间布局,实现黑土区轮作休耕空间的科学重构,为黑土区耕地资源利用与保护管理策略制定提供依据,对缓解粮食供求结构性矛盾和促进黑土区耕地资源可持续利用具有重要参考价值。

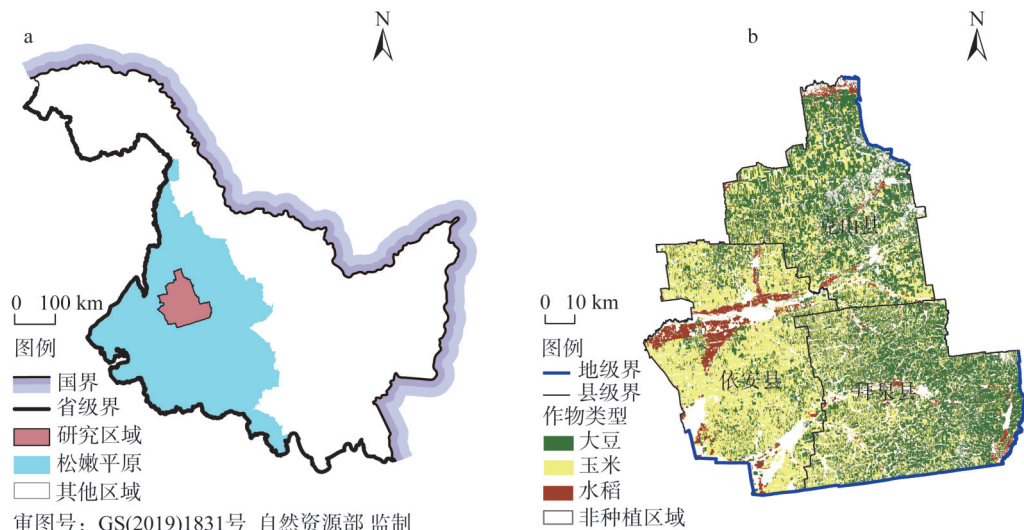
## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文以东北典型黑土区的克山县、依安县和拜泉县三个地缘相连的产粮大县为研究区。三个县位于黑龙江省齐齐哈尔市境内,地处松嫩平原黑龙江段中部的黑土带(图1)。研究区自然资源禀赋良好,耕地生产条件优越,耕地资源较为丰富,是中国重要的商品粮基地和大豆生产基地,为保障国家粮食安全和农业可持续发展做出重要贡献。2018年,研究区耕地面积约83.07万 $\text{hm}^2$ ,占土地总面积的79.42%。耕作制度为一年一熟制,主要作物水稻、大豆和玉米的种植面积占耕地总面积的90%以上。2000年以来,其玉米种植比例大幅度增加,大豆种植比例减少,存在种植结构失衡现象,且玉米多年连作进一步加剧了黑土区耕地退化。自《关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见》《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》和《探索实行耕地休耕轮作制度试点方案》等政策相继提出以来,研究区一直被列为耕地休耕轮作试点,是东北黑土地保护与种植业结构调整战略实施的重点区域,具有很强的典型性。

### 1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的中国地面气候标准值月值数据集(1981—2010年)和中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的中国气象背景数据集。中国地面气候标准值月值数据集(1981—2010年)为中国2160个基



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

本、基准地面气象观测站长年监测数据，具有站点密集、资料详尽、质检严格等优势，已被运用于当前大量学术研究，权威性高。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）统计数据表明，2018年全球平均温度比1981—2010年平均值偏高0.38℃，短时期内局部气候变化幅度较小，对作物生长环境影响不大。考虑到本文尺度对气象站点密度的要求，以及数据质量、短时期气候变化影响、近期数据获取难度等客观事实，以1981—2010年累年的月平均气象数据值近似反映2018年气候状况。地形数据来源于地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn>）30 m分辨率数字高程（DEM）数据和中国科学院资源环境科学数据中心中国1：100万地貌类型空间分布数据。土壤数据来源于黑龙江省第二次土壤普查1：100万土壤类型空间矢量数据和《黑龙江省耕地质量主要性状数据集》资料。Landsat 8（OLI）卫星遥感影像数据来源于美国地质勘探局（USGS）官网，选取2018年8月18日、6月24日和5月30日三期作物生长期卫星遥感影像（30 m×30 m）通过人工目视解译获取主要作物现状分布的矢量数据。土地利用数据来源于齐齐哈尔市第二次全国土地调查年度变更数据库。社会经济数据来源于《黑龙江省统计年鉴》和《齐齐哈尔经济统计年鉴》（2015—2019年）。

### 1.3 研究方法

本文主要运用作物种植空间适宜性评价模型、多目标优化（MOP）模型和基于智能体的土地布局优化配置（AgentLA）模型，解决耕地利用布局优化配置与轮作休耕空间重构问题。三个模型分别用于优化耕地利用空间结构、数量结构和总体布局，逻辑上为先后关系，功能上相互补充完善。其中，适宜性评价模型通过有效匹配作物生长条件与种植需求量化作物种植空间适宜性，用于优化作物的耕地利用空间结构，为耕地利用布局优化提供空间决策依据；MOP模型将定性分析与定量分析相结合，有利于解决多目标优化决策问题，用于优化作物的耕地利用数量结构，为耕地利用布局优化提供数量依据；AgentLA模型以耕地利用空间和数量结构优化结果为基础，有效兼顾数量结构、空间结



构和空间效率进行用地布局优化配置,用于构建作物的耕地利用总体优化布局。在此基础上结合耕地利用实际情况和政策导向,借助 ArcGIS 的空间分析功能实现耕地轮作及休耕空间重构(图2)。

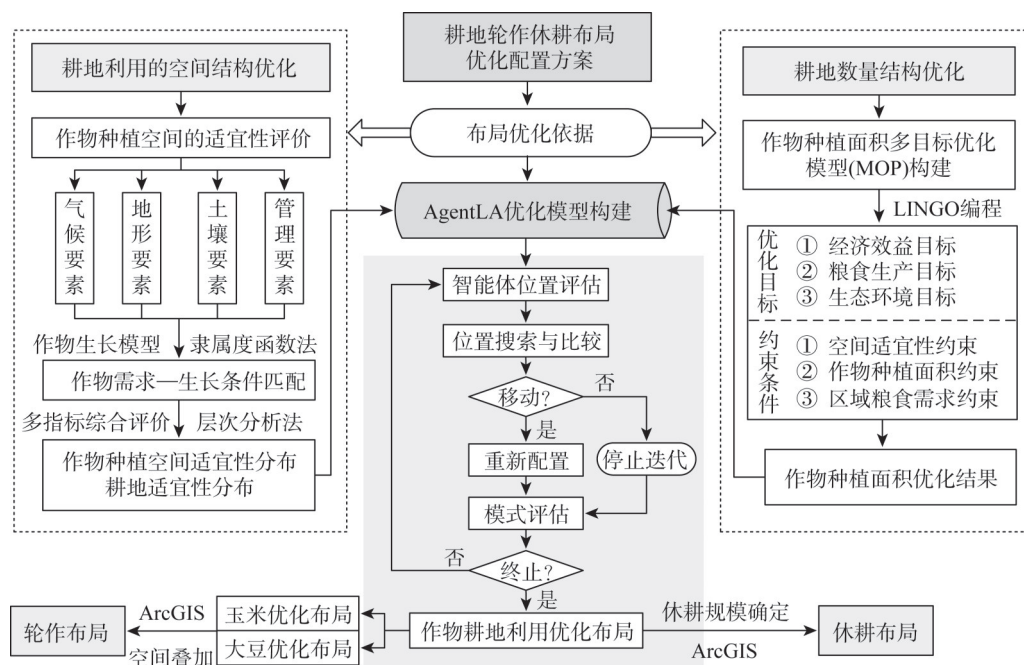


图2 研究技术路线

Fig. 2 Technical path of this dissertation

### 1.3.1 作物种植空间适宜性评价模型

作物种植空间适宜性是指一定区域空间内各类土地空间要素与作物种植需求的匹配程度。本文参考联合国粮食及农业组织 (FAO) 土地评价和农业土地适宜性评估指标体系<sup>[13,14]</sup>, 结合研究区耕地利用实际情况, 从气候、地形、土壤和管理四个方面选取 16 个代表性指标构建作物种植的空间适宜性评价指标体系, 明确主要作物种植的适宜性标准, 并运用层次分析法分别进行指标赋权 (表 1)。

本文将评价指标分为概念型 (定性指标) 和数值型 (定量指标)。概念型指标的适宜性标准和量化方法参考东北主要作物优势区耕地质量专题评价资料<sup>[15-17]</sup>。数值型指标的适宜性标准和量化方法借鉴 FAO《土地评价纲要》评价标准和黑龙江省作物气候适宜性资料<sup>[18]</sup>。其中, 生育期日平均气温运用作物生长模型 Beta 函数<sup>[19]</sup>量化。生育期降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、坡度、土层厚度、pH 值运用《DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范》的隶属度函数法计算指标分数。土壤有机质、速效钾、有效磷、灌溉潜力、排涝能力、耕作便利度、田块形状系数和防护林密度运用 ArcGIS 按照数值大小进行空间分级统计, 再对不同等级指标量化打分。指标分值统一换算为 0~100 分。

指数和法是评价类研究综合分值计算的常用方法, 根据确定的指标分值和权重对各个评价单元进行加权求和得到综合分值。当评价指标中存在比较明显的限制性指标时, 指数和法会导致评价结果出现一定偏差。借鉴木桶原理, 当某一限制性指标分值为“0”时, 将成为“短板”因素, 其他指标分值将对综合分值不起作用。因此对指数和法进行

表1 作物种植空间适宜性评价指标体系、量化标准与权重  
Table 1 Crop planting suitability evaluation index system, suitability standards and weights

要素层	指标层	标准与权重 ( <i>a~b, c, d, w</i> )		
		大豆	玉米	水稻
气候	生育期日平均气温/℃	20~23, 15, 25, 0.0941	20~23, 16, 28, 0.0797	22~24, 16, 28, 0.0678
	生育期降水量/mm	450~500, 270, 680, 0.1078	450~500, 220, 630, 0.1448	—, —, —, 0.1231
	≥10 ℃积温/℃	>2500, 2000, —, 0.2467	>2800, 2300, —, 0.2630	>2600, 2300, —, 0.2237
地形	坡度/%	0~8, —, 30, 0.0419	0~8, —, 30, 0.0295	0~2, —, 8, 0.1827
	地貌类型	—, —, —, 0.0839	—, —, —, 0.0886	—, —, —, 0.0609
土壤	土壤质地	—, —, —, 0.0613	—, —, —, 0.0727	—, —, —, 0.0121
	土层厚度/cm	>50, —, —, 0.0568	> 50, —, —, 0.0340	>100, —, —, 0.0383
	有机质/(g/kg)	—, —, —, 0.0305	—, —, —, 0.0340	—, —, —, 0.0121
	速效钾/(mg/kg)	—, —, —, 0.0146	—, —, —, 0.0139	—, —, —, 0.0050
	有效磷/(mg/kg)	—, —, —, 0.0146	—, —, —, 0.0139	—, —, —, 0.0050
	pH	6.0~6.5, 5.2, 7.5, 0.1101	5.0~7.0, 5.2, 8.0, 0.1076	5.5~6.0, 5.2, 8.2, 0.0258
管理	灌溉潜力	—, —, —, 0.0386	—, —, —, 0.0259	—, —, —, 0.0841
	排涝能力	—, —, —, 0.0551	—, —, —, 0.0445	—, —, —, 0.0841
	耕作便利度	—, —, —, 0.0092	—, —, —, 0.0075	—, —, —, 0.0146
	田块形状系数	—, —, —, 0.0183	—, —, —, 0.0201	—, —, —, 0.0319
	防护林密度	—, —, —, 0.0165	—, —, —, 0.0201	—, —, —, 0.0290

注：各指标适宜性标准参考值分别按照 *a~b, c, d, w* 的顺序列出，其中 *a~b* 为指标最适范围；*c、d* 分别为指标最低和最高阈值；*w* 为指标权重；“—” 表示相应指标无标准限制值。

限制性因子修正：当评价单元的某限制因子分值为0时，评价单元分值不以指数和法计算，直接赋值为0，既考虑了指标的整体效应，又考虑了限制性因子对适宜性结果的影响。计算公式如下：

$$F = \begin{cases} \sum_{i=1}^n f_i \times w_i & (\text{当限制性因子中不存在分值为0的情况}) \\ 0 & (\text{当限制性因子中存在分值为0的情况}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：*F* 为某一评价单元综合分值；*n* 为评价指标数（个）；*f<sub>i</sub>* 为第*i*个指标分值；*w<sub>i</sub>* 为第*i*个指标权重。

1.3.2 多目标优化(MOP)模型

综合考虑耕地的经济、社会、生态和环境价值，从经济效益、粮食生产和生态环境三个方面构建种植结构多目标优化模型，对研究区主要作物水稻、玉米和大豆的种植面积进行优化，并引入C-D生产函数量化耕地生产中各项投入与产出的关系。多目标优化模型的构建和运行借助统计数据来完成，用近5年的平均值来代表指标的一般水平。

(1) 优化目标

① 经济效益目标。以研究区三种主要作物的经济效益之和代表耕地经济效益，用三种作物的净收益之和表示，计算公式如下：

$$\max f_1(x) = \sum_{i=1}^n (Q_i p_i - x_i k_i) \tag{2}$$

$$Q_i(x, M, H, L) = A_i x_i^\alpha M_i^\beta H_i^\gamma L_i^\delta \tag{3}$$

式中:  $f_1(x)$  为三种作物的总净收益 (元);  $x_i$  为第  $i$  种作物的播种面积 ( $\text{hm}^2$ );  $i$  为作物种类,  $i=1, 2, 3$ , 其中 1 为水稻, 2 为玉米, 3 为大豆;  $Q_i$  为第  $i$  种作物的总产量 (t);  $p_i$  为第  $i$  种作物的出售价格 (元/t);  $k_i$  为第  $i$  种作物单位面积投入的资金成本 (元/ $\text{hm}^2$ );  $A_i$  为常数, 代表综合技术水平;  $M_i$  为第  $i$  种作物的农用机械投入量 (kW);  $H_i$  为第  $i$  种作物的化肥投入量 (t);  $L_i$  为第  $i$  种作物的农业劳动投入量 (人);  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\delta$  分别为作物播种面积、农用机械投入量、化肥投入量和农业劳动投入量的产出弹性系数。

② 粮食生产目标。考虑到我国目前玉米库存过剩, 大豆供不应求, 为保障粮食总量和供给结构合理化, 确定两个粮食生产目标: 粮食总产量最大化和大豆总产量最大化, 计算公式如下:

$$\max f_2(x) = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

$$\max f_3(x) = Q_3 \quad (5)$$

式中:  $f_2(x)$  为粮食总产量 (t);  $f_3(x)$  为大豆总产量 (t)。

③ 生态环境目标。包括环境效益目标和生态效益目标。环境效益目标追求化肥及农药施用量最小化, 生态效益目标追求耕地生态服务价值最大化, 计算公式如下:

$$\min f_4(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i + \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (6)$$

$$\max f_5(x) = \sum_{i=1}^n E_i x_i \quad (7)$$

式中:  $f_4(x)$  为作物总的化肥、农药使用量 (t);  $c_i$  为第  $i$  种作物单位面积化肥投入量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $b_i$  为第  $i$  种作物单位面积农药投入量 ( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $f_5(x)$  为作物总生态服务价值 (万元);  $E_i$  为第  $i$  种作物单位面积生态服务价值 (万元/ $\text{hm}^2$ )。

## (2) 约束条件

约束条件包括作物种植空间适宜性、种植总面积和区域粮食需求约束。限定各类作物最优面积不大于作物适宜种植面积 ( $S$  级)。假设耕地总量不发生变化, 水稻、玉米和大豆面积之和与现状相等。粮食自给率  $\geq 1$ , 人均粮食需求指标以《2016年中国居民膳食指南》为准。相关计算公式如下:

$$0 \leq x_i \leq S_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = S_T \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = aP \\ Q_1 \geq bP \\ Q_2 \geq cP \\ Q_3 \geq dP \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $S_i$  为适宜性评价结果中第  $i$  种作物适宜性等级为  $S$  的面积 ( $\text{hm}^2$ );  $S_T$  为现状年水稻、玉米和大豆播种面积之和 ( $\text{hm}^2$ );  $P$  为研究区总人口数 (人);  $a$  为中国年人均粮食需求量 (t/人);  $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为中国年人均水稻、玉米、大豆需求量 (t/人)。

## (3) 模型求解

本文运用LINGO软件编程实现基于理想点法的多目标优化模型求解过程。首先对各

单一目标函数分别求最优解，并构建各个目标的效率损失函数，求使效率损失尽可能小的解，将各目标函数统一转换成求最小值问题。运用层次分析法结合专家和决策主体意见对各目标赋权，通过加权求和将多目标问题统一为单目标问题。计算公式如下：

$$\begin{cases} \min f_4(x) \\ \max f(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_5(x)] \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, l \\ g_j(x) \leq G, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

$$Z_k = \begin{cases} [\max f_k(x) - f_k(x)] / \max f_k(x) & (k = 1, 2, 3, 5) \\ [f_k(x) - \min f_k(x)] / \min f_k(x) & (k = 4) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \min f(x) = W_1 Z_1 + W_2 Z_2 + W_3 Z_3 + W_4 Z_4 + W_5 Z_5 \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, l \\ g_j(x) \leq G, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $x$ 为决策向量； $f(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$ 为 $k$ 维（ $k=5$ ）目标函数； $h_j(x)$ 和 $g(x)$ 为约束函数； $Z_1 \sim Z_5$ 为效率损失值； $W$ 为各目标效率损失的权重值，其中， $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 、 $W_5$ 分别为经济效益目标、粮食总产量目标、大豆总产量目标、环境效益目标、生态效益目标效率损失权重； $l$ 、 $m$ 分别为约束条件的行数。

### 1.3.3 基于智能体的土地布局优化配置(AgentLA)模型

基于智能体的土地布局优化配置(AgentLA)模型可以很好地兼顾土地空间适宜性和空间紧凑性，并进行用地规模约束，适用于作物用地布局的优化配置。本文首先运用AgentLA模型对主要作物的耕地利用布局进行优化配置，再借助ArcGIS的空间分析功能划分耕地轮作及休耕布局。在AgentLA模型中，首先确定研究单元尺度，并按照研究区空间尺度大小生成具有随机位置的空间智能体群，智能体通过特定的适应度函数 $f$ 来选择可能的搬迁地点，并通过该位置与当前位置比较来确定是否移动，进而选择最优的空间位置。智能体通过搜集局部信息和全局信息寻找适应度值更高的位置，以实现土地空间配置的局部和全局优化。当所有智能体完成决策之后通过另一个函数 $F$ 评价布局的优化程度及可行性，通过反复迭代直到函数 $F$ 的数值变化趋于稳定且小于预设阈值，模型停止迭代并输出最终的空间优化配置结果<sup>[20]</sup>。其中，适应度函数 $f$ 包括适宜性和空间效率两方面，适宜性通过作物种植的空间适宜性结果判断，空间形态通过智能体的空间集聚度判断。空间适宜性和空间效率分别占有一定权重，权重取值直接影响适应度函数值和最终的优化布局<sup>[21]</sup>。函数 $F$ 相当于优化结果的评价函数，位于0~1之间， $F$ 值越高则优化效果越好，计算公式如下：

$$f = w_v v + w_c c \quad (14)$$

$$c = \frac{\sum_{i \in \Omega} x_i \exp(-d_i/\gamma)}{\sum_{i \in \Omega} \exp(-d_i/\gamma)} \quad (15)$$

式中： $f$ 为适应度函数； $w_v$ 为适宜性权重； $v$ 为作物种植空间适宜性值； $w_c$ 为空间效率权重（ $w_v + w_c = 1$ ）； $c$ 为空间效率值，用耕地集中连片程度表示； $x_i$ 为一个二分类变量，当一个位置被智能体占据时取值为1，反之则为0； $\Omega$ 为智能体的摩尔邻域（Moore Neighbor-

hood);  $d_i$ 为邻域内的智能体*i*到中心智能体的欧氏距离;  $\gamma$ 为一个取值范围为 [1, 10] 的补偿系数。计算公式如下:

$$F=SV-SL$$

(16)

$$SV=\sum_{i=1}^nv_i/V_{\max Sum}$$

(17)

$$SL=\frac{L_{Sum}-L_{\min Sum}}{L_{\max Sum}-L_{\min Sum}}$$

(18)

式中:  $SV$ 为适宜性目标实现程度的衡量;  $n$ 为智能体个数 (个);  $v_i$ 为第*i*个智能体的适宜性值;  $V_{\max Sum}$ 为最适宜位置的适宜性总和;  $SL$ 为形态特征, 衡量优化结果的破碎程度;  $L_{Sum}$ 为实际优化布局的整体周长;  $L_{\min Sum}$ 为假设布局最紧凑时的整体周长;  $L_{\max Sum}$ 为假设全部智能体孤立存在、互不相邻时布局的整体周长。 $SV$ 增加或 $SL$ 减小可提高布局的优化程度。

2 结果分析

2.1 作物种植的空间适宜性分析

研究区不同作物种植的空间适宜性存在较大差异。结合水稻、玉米和大豆三种主要作物种植空间适宜性范围和 ArcGIS 自然断点分级结果进行适宜性统一分级, 分为最适宜 (S1)、较适宜 (S2)、中等适宜 (S3) 边缘适宜 (S4) 和不适宜 (N) 五个等级 (表2、图3)。

水稻种植空间适宜性水平在三种作物中最低, 玉米和大豆种植的空间适宜性水平相对较高。适宜种植水稻的耕地面积比例仅为 18.16%, 适宜性高值区 (S1~S2) 集中在依安县中部偏北和克山县南部, 坡度和地貌类型是研究区水稻种植的主要限制因素。玉米种植较适宜区 (S2) 和中等适宜区 (S3) 面积占耕地总面积比例高达 79.88%, 适宜性高值区 (S1~S2) 集中在依安县北部和克山县西南部, 零星分布在依安县南部和拜泉县, 中等适宜区 (S3) 主要分布在较适宜区 (S2) 周围, 影响研究区玉米种植的主要因素是气候和土壤条件。研究区约 12.65%的耕地不适宜种植大豆, 但大豆种植适宜性高值区 (S1~S2) 面积比例高达 70.04%, 不适宜区 (N) 集中分布在依安县中部、西南部及拜泉县西南部, 其他区域的适宜性均较高, 研究区大豆种植主要受土壤 pH 这一限制因素影响。对比作物现状分布与适宜性分布图, 水稻基本分布于其适宜种植空间范围内, 验证了评价结果的科学准确性。但大豆和玉米分布与其适宜性高值区分布存在一定空间错位, 说明作物的耕地利用布局有待进一步优化调整。

表2 研究区主要作物种植空间适宜性分级统计

Table 2 Classification statistics of main crop planting suitability in the study area

作物 类型	适宜性等级	N	S4	S3	S2	S1
	适宜性分值	0	(0, 75]	(75, 80]	(80, 85]	(85, 100]
水稻	面积/km <sup>2</sup>	6798.41	694.89	475.09	286.37	52.66
	比例/%	81.84	8.36	5.72	3.45	0.63
玉米	面积/km <sup>2</sup>	0.02	1572.16	3317.53	3318.62	99.10
	比例/%	0	18.93	39.93	39.95	1.19
大豆	面积/km <sup>2</sup>	1051.28	62.13	1375.34	4671.95	1146.73
	比例/%	12.65	0.75	16.56	56.24	13.80



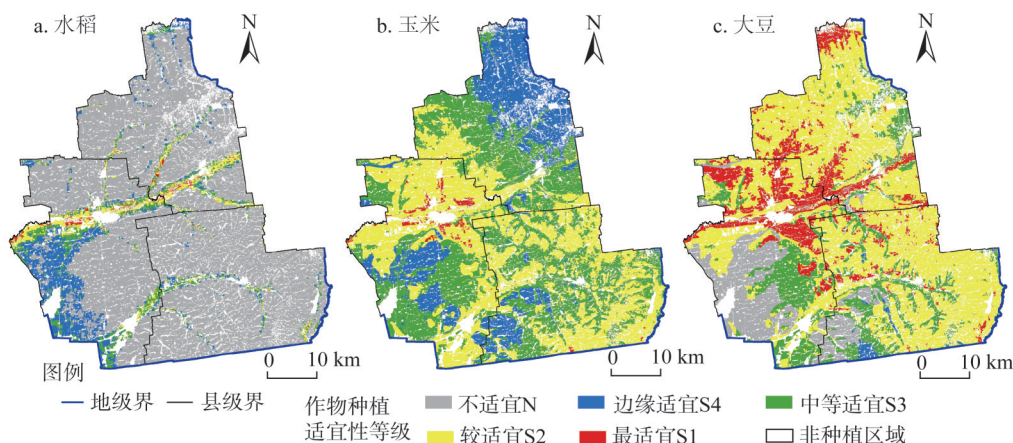


图3 研究区主要作物空间适宜性分布

Fig. 3 The planting suitability of main crops in the study area

## 2.2 种植结构优化结果

本文运用层次分析法对各优化目标进行赋权,并依据优化目标整体效率损失情况判断优化结果是否在可接受范围内,进而筛选较优的种植结构方案。基于现阶段社会需求,扩大大豆种植面积是需要考虑的首要问题,认为大豆总产量目标的重要程度最高。耕地生产过度依赖农药化肥将破坏生态环境,环境效益目标的重要性也很高,仅次于大豆总产量。耕地经济效益直接影响农民收入,这也是保障农业经济发展和农村建设的关键,因此经济效益目标也较为重要。目前我国粮食总产量已实现多年连增,耕地问题逐渐由总量不足转变为结构性矛盾,提升粮食总产量已不是当前阶段我国农业发展的首要目标,在保障粮食总量安全的同时,应进一步追求粮食供求结构平衡,提升短缺粮食作物的供给水平,因此与以上三个目标相比,粮食总产量的重要程度较小。此外,耕地生产提供一定生态服务价值,但其主要功能仍是提供粮食和经济价值,认为生态效益目标重要程度很小。

基于各优化目标的重要性分析,运用层次分析法构造判断矩阵,最终得到经济效益、粮食总产量、大豆总产量、环境效益和生态效益目标权重分别为0.2、0.15、0.4、0.22和0.03,一致性比为0.0578,通过一致性检验。经优化,研究区水稻、玉米和大豆种植面积分别为254.53 km<sup>2</sup>、3244.83 km<sup>2</sup>和4501.34 km<sup>2</sup>,与研究区现状作物种植面积相比,水稻种植面积减少181.49 km<sup>2</sup>,玉米种植面积减少552.15 km<sup>2</sup>,大豆种植面积增加733.64 km<sup>2</sup>。该方案的目标总体效率损失值为0.13。

为进一步验证耕地数量结构优化结果的科学性,将现状与优化后各目标的效益损失进行比较,发现优化后耕地利用整体效益损失明显减少,其中经济、大豆总产量、环境和生态效益损失均有所减少,仅粮食总产量效益损失略有增加(表3)。目前我国已实现粮食产量的多年连增,粮食安全问题已由总量不足转变为结构性矛盾,因此认为牺牲部分粮食总量以满足其他目标的需求是合理的。结合研究区耕地利用实际情况,认为优化结果达到理想目标,对各类作物数量的优化结果均比较满意,效率损失在可接受范围内,优化结果实现了经济、社会和生态整体效益的提升。

表3 研究区耕地现状数量结构与优化结果的效益损失比较

Table 3 Comparison of the benefit loss between current cultivated land use structure and the optimization results in the study area

	经济效益损失	粮食总产量效益损失	大豆总产量效益损失	环境效益损失	生态效益损失	整体效益损失
现状	0.31	0.19	0.45	0.12	0.14	0.24
优化	0.26	0.25	0.06	0.06	0.09	0.15

2.3 耕地轮作布局优化配置结果

通过对作物种植特性与耕地利用实际情况分析,结合《全省2018年耕地轮作休耕试点实施方案》,将玉米—大豆轮作定为研究区耕地轮作的主要类型。基于玉米、大豆种植空间适宜性评价结果和种植面积优化结果,运用AgentLA模型分别对玉米和大豆的耕地利用布局进行优化配置,将玉米和大豆的耕地栅格优化数量分别设为324542个和450215个。经过多次试验发现, $w_i$ 值在0.7时玉米和大豆耕地利用分布的适应度 $F$ 值最大,分别为0.9246和0.8717,优化结果达到最佳。玉米和大豆的耕地利用布局分别经历了156次和113次迭代,适应度函数值趋于平稳,停止迭代并输出优化结果,得到玉米和大豆的耕地利用优化布局。为兼顾不轮作作物的种植适宜性,运用ArcGIS空间叠加取交集的方法得到玉米—大豆轮作布局,该布局耕地总栅格数为278414个,占耕地总面积的33.51%。其中依安县玉米—大豆轮作布局面积最大,占耕地总面积的16.73%;克山县和拜泉县玉米—大豆轮作布局面积相似,分别占耕地总面积的7.88%和8.89%(表4)。玉米—大豆轮作布局集中分布于克山县西部和依安县北部,零星分布于克山县南部、依安县东南部和拜泉县(图4)。

与2018年、2019年研究区耕地轮作试点实施现状相比,优化后轮作面积及比例明显增加,各县轮作面积及比例发生明显变化。耕地轮作试点实施现状中,依安县耕地轮作面积及比例明显低于克山县和拜泉县。经优化发现依安县耕地轮作优势最为突出,更适于玉米—大豆的轮作,应适当增加依安县的玉米—大豆轮作面积,充分利用其耕地资源优势。综合考虑研究区土壤和气候等自然条件,应采取一年玉米一年大豆,或两年玉米一年大豆的轮作模式,具体可根据市场价格和实际需求,因地制宜、因时制宜地选择轮作模式,在保障经济效益的同时实现黑土区耕地修养生息和可持续利用。

2.4 耕地休耕布局优化配置结果

2.4.1 耕地休耕规模确定

已有研究多基于耕地压力指数测算保障一定区域内粮食安全的休耕最大规模<sup>[22]</sup>。运用该方法测算结果表明,研究区各县耕地的最大可休耕比例均超过70%,整体可休耕比

表4 研究区耕地轮作布局面积统计及与现状对比

Table 4 Statistics on the area of cultivated land rotation layout in the study area and its comparison with the status quo

县名	2018年轮作实施现状		2019年轮作实施现状		耕地轮作布局优化结果		
	面积/km <sup>2</sup>	占耕地总面积比例/%	面积/km <sup>2</sup>	占耕地总面积比例/%	栅格个数 (100 m×100 m)	面积/km <sup>2</sup>	占耕地总面积比例/%
克山	435.60	5.24	488.27	5.88	65483	654.83	7.88
依安	181.42	2.18	288.16	3.47	139023	1390.23	16.73
拜泉	442.94	5.33	509.60	6.13	73908	739.08	8.89
合计	1059.96	12.76	1286.04	15.48	278414	2784.14	33.51





表5 不同情景下研究区耕地休耕布局面积统计

Table 5 Statistics on the area of cultivated land fallow layout in different scenarios in the study area

县名	情景1		情景2		情景3	
	栅格个数 (100 m×100 m)	占耕地总 面积比例/%	栅格个数 (100 m×100 m)	占耕地总 面积比例/%	栅格个数 (100 m×100 m)	占耕地总 面积比例/%
克山	980	0.12	1584	0.19	36202	4.36
依安	26445	3.18	58085	6.99	96025	11.56
拜泉	14121	1.70	23423	2.82	33957	4.09
合计	41546	5.00	83092	10.00	166184	20.00

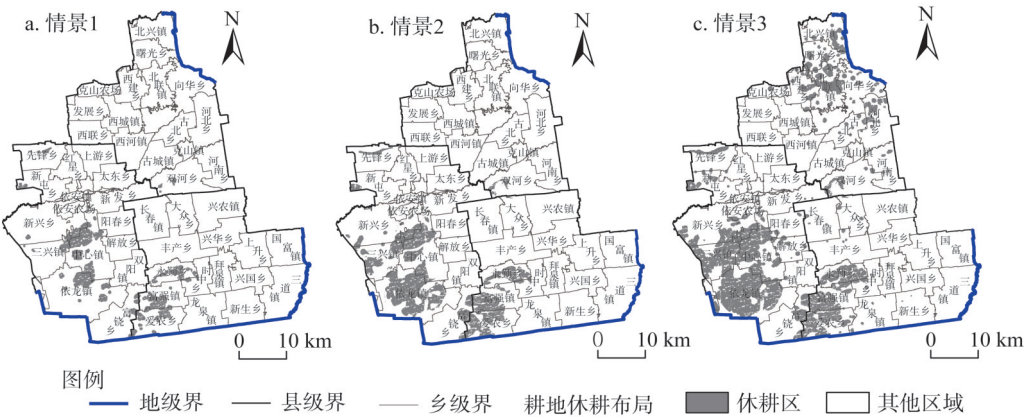


图5 不同情景下的研究区耕地休耕布局

Fig. 5 Layout of cultivated land fallow in different scenarios in the study area

格数量较少，仅占耕地总面积的0.19%，零星分布于克山县南部的双河乡。

情景3下的耕地休耕布局在情景2的基础上向其他地区扩张，克山县休耕比例明显增加。依安县休耕栅格占耕地总面积的11.56%，集中分布于依安县中部的中心镇、南部的依龙镇和西南部的三兴镇，零星分布于依安县先锋乡、新屯乡、新兴乡、解放乡和富饶乡等；克山县休耕栅格占耕地总面积的4.36%，集中分布于克山县中部偏北的北联镇，零星分布于克山县北部的北兴镇、曙光乡、西建乡，以及克山县东北部的向华乡、东部的河北乡和南部的双河乡等；拜泉县休耕栅格占耕地总面积的4.09%，集中分布于拜泉县西南部的永勤乡、富强镇和爱农乡。

3 结论与讨论

3.1 结论

突破现有“任务+指标”式轮作休耕布局的路径依赖，科学重构黑土区轮作和休耕空间对保障耕地休养生息、促进黑土区耕地资源可持续利用和缓解粮食供求结构矛盾具有重要作用。本文以东北黑土区典型区域——克山县、依安县和拜泉县三个产粮大县为研究区，通过构建作物种植空间适宜性评价模型和多目标优化（MOP）模型对主要作物的耕地利用空间结构和数量结构进行优化，并兼顾土地空间适宜性与空间集聚性，运用基



于智能体的土地布局优化配置 (AgentLA) 模型实现地块尺度下黑土区轮作和休耕空间的优化与重构。主要结论如下:

(1) 确定了以玉米—大豆轮作为主的东北典型黑土区耕地轮作布局, 集中分布于克山县西部和依安县北部, 零星分布于克山县南部、依安县东南部和拜泉县; 轮作总面积占耕地总面积的 33.51%。从空间适宜性来看, 依安县玉米—大豆轮作优势突出, 但 2018—2019 年研究区耕地轮作试点实施工作中对该县耕地的轮作力度不够, 应进一步提升依安县玉米—大豆轮作比例, 以田养田, 培肥黑土区耕地地力。从种植结构来看, 大豆种植比例有效提升, 有利于缓解粮食供求结构失衡问题。

(2) 以常规耕地压力指数测算休耕规模不适用于东北黑土区实际情况, 应兼顾区域内与区域外人口的粮食需求。借鉴欧美休耕经验, 分三种粮食供求情景, 并优先选取耕地适宜性低值区确定耕地休耕布局: ① 情景一: 粮食需求大于供给, 休耕比例 5%, 主要分布于依安县中心镇和依龙镇, 拜泉县永勤乡、富强镇和爱农乡, 零星分布于克山县双河乡; ② 情景二: 粮食供需平衡, 休耕比例 10%, 在情景一的基础上进一步扩展, 增加了依安县的三兴镇、富饶乡等的部分区域; ③ 情景三: 粮食供给大于需求, 休耕比例 20%, 在情景二的基础上进一步扩展, 增加了克山县北联镇, 依安县先锋乡、新屯乡、新兴乡、解放乡, 以及克山县北兴镇、曙光乡、西建乡、向华乡和河北乡等的部分区域。基于不同情景确定休耕规模有利于应对市场变化, 灵活转变休耕策略, 采取弹性化的黑土区耕地保护措施。

(3) 作物种植空间适宜性量化评估结果为确定黑土区轮作休耕布局提供重要的空间重构依据, 种植结构多目标优化结果和粮食供求情景设定对轮作和休耕规模进行了合理约束。兼顾不同作物种植的空间适宜性并优先选择适宜性高值区划定轮作布局、选择适宜性低值区划定休耕布局有利于提升耕地利用效率和生态效益。确定不同作物最优种植规模为玉米—大豆轮作空间范围的划定提供科学约束, 有助于协调作物种植空间关系、调整粮食供给结构。地块尺度下的耕地轮作和休耕布局兼顾了作物种植空间适宜性与空间集聚性, 对提升黑土区耕地利用效率、管理效能和可持续利用能力具有重要作用。

### 3.2 讨论与政策建议

黑土区耕地轮作休耕布局不应仅以农户自愿申报或政府行政主导的方式确定, 更应关注耕地适宜性、种植结构、粮食供需和空间效率等问题, 通过合理匹配各类耕地利用空间要素, 实现耕地利用数量结构和空间结构同步优化。当前耕地轮作休耕布局相关研究对耕地上不同作物种植的空间适宜性、集聚性考虑不足, 对作物种植结构优化关注不够, 亟待调整轮作休耕布局方案, 重构轮作休耕空间。本文通过合理匹配黑土区主要粮食作物的各类生长要素条件与需求, 量化评估作物种植空间适宜性, 实现主要作物的耕地利用空间结构优化, 并设定多种目标优化粮食作物种植结构, 对提升黑土区耕地利用效率、缓解粮食供求结构性矛盾具有重要作用。同时, 结合作物生长特性和轮作休耕规律, 兼顾作物种植的空间适宜性和集聚性, 将用地与养地相结合, 重构地块尺度下的轮作和休耕空间, 对促进黑土区耕地资源可持续利用具有重要意义。耕地轮作休耕制度的落实是一项复杂的系统工程, 不仅涉及耕地利用空间要素的优化匹配和规模约束, 还涉及政策制度推进的实施管理过程。为保障黑土区耕地轮作休耕有效实施, 实现黑土区耕地资源的用养结合、保护利用, 提出以下政策建议:

(1) 因地制宜制定轮作休耕实施方案。政府在制定黑土区轮作休耕实施方案时应考

虑区域间的差异性,厘清黑土区耕地资源禀赋条件、作物种植适宜性差异、种植结构特点和粮食供求矛盾等情况,以优化种植结构、调节粮食供需为目标确定轮作休耕规模,以充分利用局域耕地资源比较优势和兼顾不同作物种植适宜性为导向明确轮作休耕空间优先序,兼顾资源利用效率与生态效益。在此基础上制定详细的实施计划,包括轮作休耕位置、面积及组织程序等,并由省、市到县、乡逐级分解任务,以地块为单元细化黑土区轮作休耕指标和空间布局,确保黑土地保护战略的有效落实。

(2) 健全黑土区耕地轮作休耕相关主体利益协调与补偿机制。轮作休耕实施过程中涉及政府、村集体经济组织、农业生产经营主体等多主体,作物耕地利用布局调整将直接导致相关主体权益及经济利益发生变化<sup>[23]</sup>,且不同农业生产经营主体的决策机制与生产习惯存在差异。因此应构建一套完善的政策体系对不同主体利益进行协调和补偿,在明晰耕地产权、充分考虑公民意愿和利益的基础上,明确补偿标准和方式。通过对轮作休耕区域内相关主体提供农业生产性服务、农业技术指导、补贴政策支持等方式,有效引导各主体的种植决策,自发进行黑土区耕地资源保护。

(3) 构建黑土区耕地轮作休耕的实施效果评价及考核体系。轮作休耕是一项长期动态工程,应积极探索轮作休耕的实施效果评价及考核体系,确保黑土区耕地资源保护的实施成效。可根据轮作休耕实施计划,从增加黑土区耕地肥力、提升作物产量、缓解粮食供求矛盾、调节生态环境等方面进行评价并建立档案,定期评估轮作休耕实施效果,并建立一套考核办法,明确黑土区耕地资源保护责任、目标与量化考核标准,对轮作休耕实施效果突出的地区给予一定奖励支持。

## 参考文献(References):

- [1] 赵其国,滕应,黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考. 生态环境学报, 2017, 26(1): 1-5. [ZHAO Q G, TENG Y, HUANG G Q. Consideration about exploring pilot program of farmland rotation and fallow system in China. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(1): 1-5.]
- [2] 陈展图,杨庆媛. 中国耕地休耕制度基本框架构建. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 126-136. [CHEN Z T, YANG Q Y. Fundamental framework of China's fallow system. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 126-136.]
- [3] 黄国勤,赵其国. 中国典型地区轮作休耕模式与发展策略. 土壤学报, 2018, 55(2): 283-292. [HUANG G Q, ZHAO Q G. Mode of rotation/fallow management in typical areas of China and its development strategy. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 283-292.]
- [4] 石飞,杨庆媛,王成,等. 行动者网络视角的生态退化区耕地休耕管护模式:以贵州省松桃县为例. 自然资源学报, 2021, 36(11): 2892-2912. [SHI F, YANG Q Y, WANG C, et al. Research on the management and protection modes of the cultivated land in fallow in the ecologically-degraded areas from the actor-network perspective: A case study in Songtao county, Guizhou province, China. Journal of Natural Resources, 2021, 36(11): 2892-2912.]
- [5] 王盼,阎建忠,杨柳,等. 轮作休耕对劳动力转移的影响:以河北、甘肃、云南三省为例. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2348-2362. [WANG P, YAN J Z, YANG L, et al. Effect of rotation fallow on labor transfer: A case study in three provinces of Hebei, Gansu and Yunnan. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2348-2362.]
- [6] 杨人豪,杨庆媛,印文,等. 基于结构方程模型的休耕地管护意愿及行为分析:以河北省邢台市为例. 干旱区地理, 2020, 43(1): 260-270. [YANG R H, YANG Q Y, YIN W, et al. Farmers' willingness and behavior in managing and protecting the fallow land based on SEM: A case study of Xingtai, Hebei. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 260-270.]
- [7] 吴萍. 构建耕地轮作休耕生态补偿制度的思考. 农村经济, 2017, (10): 112-117. [WU P. Thoughts on constructing the ecological compensation system of cultivated land rotation and fallow. Rural Economy, 2017, (10): 112-117.]
- [8] 石飞,杨庆媛,王成,等. 基于耕地能值—生态足迹的耕地休耕规模研究:以贵州省松桃县为例. 生态学报, 2021, 41

- (14): 5747-5763. [SHI F, YANG Q Y, WANG C, et al. Scale of the cultivated land fallow based on the emergy-ecological footprint in Songtao county, Guizhou province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5747-5763.]
- [9] D'HAENZE D, DECKERS J, RAES D, et al. Environmental and socio-economic impacts of institutional reforms on the agricultural sector of Vietnam. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105(1-2): 59-76.
- [10] 杨庆媛, 毕国华, 陈展图, 等. 喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究: 以贵州省晴隆县为例. *地理学报*, 2018, 73(11): 2250-2266. [YANG Q Y, BI G H, CHEN Z T, et al. Spatial allocation of fallow land in karst rocky desertification areas: A case study in Qinglong county, Guizhou province. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2250-2266.]
- [11] 赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域虚拟休耕规模与空间布局研究. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 103-107. [ZHAO Y T, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Simulating fallow land at regional scale: Size and spatial distribution. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 103-107.]
- [12] SONG G, ZHANG H M. Cultivated land use layout adjustment based on crop planting suitability: A case study of typical counties in Northeast China. *Land*, 2021, 10: 107.
- [13] FAO. Land evaluation towards a revised framework. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007: 107.
- [14] ELSHEIKH R, MOHAMED SHARIFF A R B, AMIRI F, et al. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 93: 98-110.
- [15] 任意, 黄健, 薛彦东. 东北玉米优势区耕地质量专题评价. 北京: 中国农业出版社, 2017. [REN Y, HUANG J, XUE Y D. Thematic Evaluation of Cultivated Land Quality in Corn Superiority Areas in Northeast China. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]
- [16] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 东北农业大学. 东北水稻优势区耕地质量专题评价. 北京: 中国农业出版社, 2017. [National Agro-Tech Extension and Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, Northeast Agricultural University. Thematic Evaluation of Cultivated Land Quality in Rice Superiority Areas in Northeast China. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]
- [17] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 黑龙江省农业科学院. 东北大豆优势区耕地质量专题评价. 北京: 中国农业出版社, 2017. [National Agro-Tech Extension and Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences. Thematic Evaluation of Cultivated Land Quality in Soybean Superiority Areas in Northeast China. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]
- [18] 刘东辉. 主要作物气候适宜性评价指标体系的研究. *黑龙江农业科学*, 1991, (4): 9-14. [LIU D H. Study on evaluation index system of climate suitability of main crops. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 1991, (4): 9-14.]
- [19] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展. *中国农业气象*, 2019, 40(7): 444-459. [SUN Y Y, SHEN S H. Research progress in application of crop growth models. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(7): 444-459.]
- [20] CHEN Y, LI X, LIU X, et al. An agent-based model for optimal land allocation (AgentLA) with a contiguity constraint. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(8): 1269-1288.
- [21] 周浩, 雷国平, 杨雪听, 等. 基于 AgentLA 模型的农田精准灌溉管理分区研究. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 274-279, 285. [ZHOU H, LEI G P, YANG X X, et al. Study on precision irrigation management zones in farmland according agent-based model for optimal land allocation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 274-279, 285.]
- [22] 谭术魁, 韩思雨, 张路. 粮食安全视角下粮食主产区耕地休耕规模及动态仿真研究. *中国土地科学*, 2020, 34(2): 9-17. [TAN S K, HAN S Y, ZHANG L. Study on fallow scale and dynamical simulation of major grain producing areas in China from the food security perspective. *China Land Science*, 2020, 34(2): 9-17.]
- [23] 刘卫柏, 杨胜苏, 李中, 等. 重金属污染治理试点地区农户对耕地休耕政策的满意度及其影响因素. *经济地理*, 2021, 41(1): 158-164. [LIU W B, YANG S S, LI Z, et al. Satisfaction of farmers upon the fallow policy of cultivated land and its influencing factors in the pilot area of heavy metal pollution governance. *Economic Geography*, 2021, 41(1): 158-164.]

## Spatial reconstruction of farmland rotation and fallow in the typical black soil region of Northeast China

SONG Ge<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-mei<sup>3</sup>

(1. School of Humanities and Law, Northeast University, Shenyang 110169, China;

2. Key Laboratory of Land Protection and Use, Department of Natural Resources of Liaoning Province, Shenyang 110169, China; 3. School of Public Management, Liaoning University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** Rotation and fallow are important means to ensure the sustainable utilization of cultivated land resources in black soil regions. Determining the scale and spatial distribution of cultivated land for crop rotation and fallow scientifically is of great significance for undertaking land reclamation, improving soil fertility, and balancing the structure of food supply and demand in the black soil regions. Taking the typical black soil regions in Northeast China: Keshan county, Baiquan county, and Yi'an county as the research area, this paper reconstructs the farmland rotation and fallow layout at the plot scale by using the crop planting suitability evaluation model, multi-objective optimization (MOP) model, and agent-based land layout optimization allocation (AgentLA) model. Findings show that: (1) There are obvious spatial differences between high-value and low-value areas of the planting suitability of main crops. The high-value areas of corn and soybean planting suitability intersect in the north of Yi'an and the west of Keshan, which are the dominant areas of corn-soybean rotation. And the low-value areas converge in the south of Yi'an and the southwest of Baiquan, which are the key areas for fallow farming. (2) The crop rotation scale based on the optimization of the planting structure has achieved an increase in the proportion of soybean planting and a decrease in corn planting, alleviating the contradiction between the current phased oversupply of corn and insufficient supply of soybeans. Determining the scale of fallow by setting a variety of food supply and demand scenarios is conducive to flexibly responding to changes in the food market. (3) A rotation and fallow layout that takes into account the planting suitability and agglomeration of cultivated land is conducive to making full use of the comparative advantages of cultivated land resource endowments, developing large-scale operations, and playing an important role in improving the efficiency of cultivated land use. This research has helped to realize the simultaneous improvement of the spatial suitability, spatial agglomeration, rationality of planting structure, and the stability of food supply and demand of cultivated land, by rationally reconstructing the farmland rotation and fallow space in the black soil region, which provides policy reference for realizing sustainable utilization of cultivated land resources and food security in black soil regions.

**Keywords:** sustainable use of cultivated land; crop rotation and fallow; spatial reconstruction; food security; typical black soil region in Northeast China