

耕地“三位一体”保护视角下中国省域休耕规模与空间布局

熊雯颖, 孟菲, 陈航, 谭永忠*

(浙江大学公共管理学院土地管理系, 杭州 310058)

摘要: 实施土地休耕是落实“藏粮于地”战略的关键, 目前宏观尺度的全国休耕空间布局尚未确定, 该研究探究了粮食安全约束下的全国范围内最大休耕规模以及中国省域休耕空间优化布局。以耕地数量、质量和生态“三位一体”保护为研究视角, 该研究通过系统动力学、灰色预测模型等方法构建最大休耕规模预测模型, 并结合“压力-状态-响应”模型构建休耕迫切度评价体系, 依据评价结果分配各省休耕规模, 从而得到中国省域休耕空间布局。结果表明: 1) 预计在90%、95%、100%的粮食自给率下, 到2030年中国最大休耕规模分别为3 237.310万、2 678.970万和2 120.640万 hm^2 ; 2) 省域之间的休耕迫切度水平存在差异, 上海、内蒙古等地休耕迫切度较高, 四川、广西等地休耕迫切度较低; 3) 在耕地三位一体保护的约束条件下, 地区之间休耕规模差异较大, 内蒙古、甘肃等地休耕规模较大, 北京、上海等地休耕规模较小。该研究将数量、质量和生态多元目标融合进休耕空间分区研究, 能够为未来休耕制度的全面建立以及精准落地提供思路与方法参考。

关键词: 休耕规模; 休耕空间布局; 系统动力学; PSR模型; 耕地保护

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405110

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0240-11

熊雯颖, 孟菲, 陈航, 等. 耕地“三位一体”保护视角下中国省域休耕规模与空间布局[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18):

240-250. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405110 <http://www.tcsae.org>

XIONG Wenying, MENG Fei, CHEN Hang, et al. Provincial fallow scale and fallow spatial layout of cultivated land in China from the "Trinity" protection perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 240-250. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405110 <http://www.tcsae.org>

0 引言

作为农业生产的基本资料和土地资源的重要部分, 充足的耕地是保障粮食安全的基石。目前, 中国耕地资源面临着数量保护压力大、总体质量不佳、生态退化等问题, 耕地保护形势较为严峻^[1-3]。在耕地数量、质量、生态“三位一体”的保护新格局下, 实施休耕是落实“藏粮于地”战略的关键, 也是耕地资源可持续利用和保障农业可持续发展的重要手段^[4-5]。2016年以来, 中国在河北、湖南、云南、贵州、甘肃等地开展休耕试点。作为一种土地利用方式, 休耕是指在一定时期内限制耕地的耕种行为, 有时可能采取一些管护措施, 旨在保护、养育、恢复地力。根据休耕时长不同, 休耕可以分为长期休耕、短期休耕以及季节性休耕^[6-7]。由于长期休耕容易导致耕地撂荒, 为确保粮食安全, 中国的休耕主要采取以连续三年为一期的短期休耕和季节性休耕。在实践中, 由于缺乏科学依据, 部分地方政府在休耕试点布局时产

生空间错配, 减弱了休耕试点的实施效果^[8]。由于地区之间在社会经济、自然条件等方面存在差异, 不合理的休耕空间布局无法兼顾复杂的现实状况, 会导致耕地资源错配, 阻碍土地永续利用。随着休耕制度逐步构建, 全国的休耕空间布局亟待确定。

休耕空间布局是对休耕土地在数量和空间两个维度上的配置, 回答的是“休多少”和“休哪里”的问题, 科学构建休耕布局对于休耕政策的落实有重要意义^[9-10]。休耕空间布局的研究主要包括休耕区域的识别、休耕规模的确定以及休耕空间的优化配置^[10]。休耕区的识别包括理论休耕区域与实际休耕区域两类, 实际休耕区识别的研究主要通过遥感和实地调研获取数据, 绘制休耕空间分布图^[11-12]。理论上的休耕区的识别的主流方法则是构建休耕评价指标体系。已有研究从不同视角建立了休耕迫切度或适宜性评价体系, 主要针对重金属污染状况^[13]、水资源^[14]、耕地生态状况^[15]、耕地质量^[16]、耕地利用强度^[17]、耕地能值^[18]等方面选取相应的评价指标, 根据评价结果确定合适的休耕区域。

休耕规模的测算是当前休耕空间布局研究的重难点。从政策实践来看, 美国土地休耕项目 (conservation reserve program, CRP) 的休耕规模由农业法案确定, 避免了休耕面积过大给经济带来负面影响^[19]。欧盟以及日本的休耕规模则依据农业市场变化确定, 产品价格上升时适当紧缩休耕面积, 粮价平稳则放宽休耕规模^[20]。此

收稿日期: 2024-05-15 修订日期: 2024-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071269); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (S20240008); 浙江省哲学社会科学规划项目 (21WZQH12YB); 国家社会科学基金项目 (19FGLB054)

作者简介: 熊雯颖, 博士生, 主要研究方向为耕地资源利用与保护。

Email: xiongwenying@zju.edu.cn

*通信作者: 谭永忠, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为耕地资源利用与保护。Email: tanyongzhong@zju.edu.cn

外，学者采用多种方法进行休耕规模测算研究，例如 PLANTINGA 等^[21]运用供给曲线和 CRP 项目数据计算出美国休耕规模。国内研究中，赵雲泰等^[22]较早进行休耕规模测算，参考耕地保有量计算公式建立了休耕规模测算模型。目前休耕规模测算的研究主要基于粮食安全视角开展^[23]，所运用的预测方法主要包括系统动力学^[24]、灰色模型^[25]、回归分析^[23]、趋势外推法^[26]等，不同方法存在优缺点，单一方法得到的预测结果的科学性和准确性有待提升。

休耕空间优化配置研究综合了休耕耕地选择和规模测算的内容，通过构建评价体系和测算模型，对研究区休耕空间布局进行优化。区域尺度的休耕空间配置研究已经积累了较多成果，如针对生态脆弱区休耕试点^[25]、粮食主产区^[24]、新疆干旱区^[16]、中国西南地区^[27]等地的研究。宏观尺度研究相对较少，已有研究运用了粮食生产消费模型^[28]、耕地保有量^[29]等模型预测并确定中国休耕空间布局。休耕空间布局研究在区域层面已取得一定成果，然而仍存在以下不足：1) 关于休耕地识别的评价体系多是单一维度和特定区域，缺乏对全国尺度的全面评价；2) 休耕规模的预测科学性有待加强，不同的预测方法结果存在较大差异；3) 休耕空间布局的宏观研究缺乏，难以为中国全面推行休耕制度提供理论参考。因此，本研究在已有研究基础上进行拓展，旨在确定中国休耕规模及其空间布局，通过构建最大休耕规模预测模型，科学预测多情景粮食安全约束下到 2030 年全国范围的最大休耕面积，并融合耕地质量评价和基于压力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR) 模型的生态安全评价，构成结合耕地质量和生态的休耕迫切度评价体系，根据评价结果对休耕规模进行分配，得到宏观层面的中国省域休耕空间布局，以期为全面建立休耕制度和合理进行休耕安排提供参考。

1 研究思路与数据来源

1.1 研究思路

本研究以中国各省份 (自治区、直辖市) 为研究对象 (香港、澳门和台湾除外)，以耕地休耕空间配置为研究问题。首先，根据耕地保有量模型构建基于粮食安全的休耕规模测算模型，利用系统动力学、灰色预测模型、时间序列分析、指数衰减模型等方法对未来中国的休耕规模进行科学预测。其次，参考 PSR 理论，构建基于耕地质量和生态安全的中国省域耕地休耕迫切度评价体系。最后，根据评价结果对各省休耕规模进行分配，明确不同的休耕区分类，为中国休耕空间配置提供借鉴，为建立差别化休耕制度体系提供理论参考以及技术支撑。研究框架如图 1 所示。

1.2 数据来源

统计数据主要来自于国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/>) 以及历年统计年鉴。其中，人口、水资源量、粮食单产、森林覆盖率、总播种面积、粮食播种面积、

有效灌溉面积、第一产业增加值、地区生产总值、农民人均可支配收入、农业机械总动力等数据主要来自 2000—2020 年《中国统计年鉴》，各省化肥、农药、农用薄膜使用量、农作物受灾面积、废水排放量、耕地面积等数据来自 2020 年《中国农村统计年鉴》，土地面积数据来源于 2014 年《中国区域经济统计年鉴》，土地沙化面积和环境污染治理投资占 GDP 比例来自 2020 年《中国环境统计年鉴》，耕地总面积及增减变动数据来自 2005—2018 年《中国国土资源统计年鉴》。低等地面积来自 2016 年全国耕地质量等别更新评价数据结果。

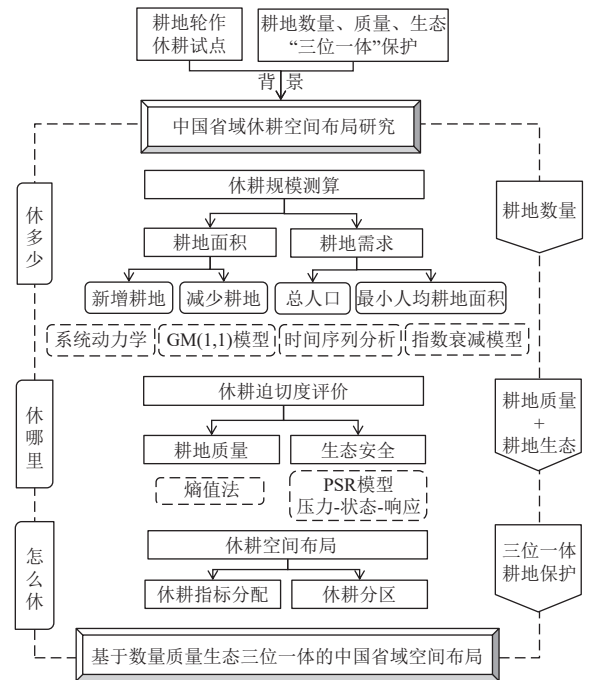


图 1 中国省域休耕空间布局研究框架
Fig.1 Framework of provincial fallow spatial layout in China

2 研究方法

2.1 休耕规模仿真模型

2.1.1 基于粮食安全的最大休耕规模测算模型公式

休耕规模是指在一定时期区域内可以用于休耕的耕地面积^[25]。以往对于休耕规模测算的研究多数选择的是基于粮食安全的现实最大休耕规模^[28-29]。参考已有的研究成果^[22,29]，本文运用耕地保有量模型^[30-32]测算休耕规模，模型假设不存在贸易需求和仓储需求，仅从个人层面的营养需求考虑耕地需求。对于最大休耕规模预测的计算式如下：

$$T = F - S \tag{1}$$

$$F = R + \Delta T - \Delta R \tag{2}$$

$$S = P \cdot \frac{\beta \cdot G}{p \cdot q \cdot k} \tag{3}$$

式中 T 为目标年耕地最大休耕面积 (hm^2)； F 为目标年耕地总面积 (hm^2)； S 为基于粮食安全的目标年耕地需求量 (hm^2)，也即最小人均耕地面积与人口数量的耕地

保有量。耕地总面积及需求量共同决定了基于粮食安全约束的最大休耕规模大小,即现实条件下能供给的所有休耕面积。 R 为基期年耕地总面积(hm^2); ΔT 为基期年到目标年的耕地新增量(hm^2); ΔR 为基期年到目标年的耕地减少量(hm^2)。 P 为目标年总人口数; β 为目标年的粮食自给率; G 为目标年人均粮食需求量(kg); p 为目标年粮食单位面积产量(kg/hm^2); q 为目标年粮食播种面积占农作物播种面积比例; k 为目标年复种指数。

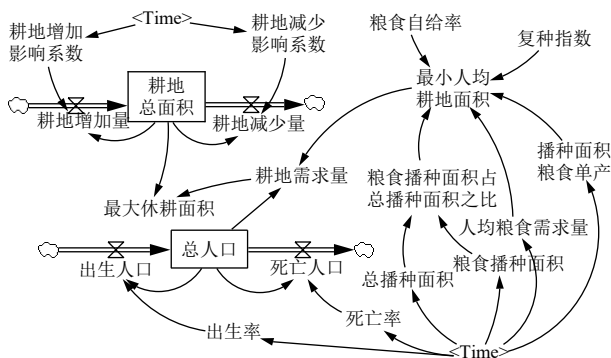
由于单产潜力在实际中不能无限制提升,对粮食单产构建指数回归模型^[33],计算式如下:

$$V_q - V_t = e^{-at+b} \quad (4)$$

式中 V_q 为平均粮食单产潜力值(kg/hm^2), V_t 为第 t 年的粮食单位面积产量(kg/hm^2), e^{-at+b} 为指数衰减模数。其中, V_q 参考已有研究^[31]设定为 $11\,349.21\text{ kg}/\text{hm}^2$,参数 a 和 b 通过2000—2021年历史数据计算得出。

2.1.2 休耕规模测算模型构建

系统动力学(system dynamics, SD)以信息论、控制论等为理论基础,通过识别系统内部结构及其因果关系构建模型,依托计算机仿真技术对所研究系统的动态变化进行推演^[34]。系统动力学可以充分利用系统内部信息反馈,仿真参数能够根据需要进行不断调整,便于预测不同情况。本研究参考谭文魁等^[24]的研究成果,构建最大休耕规模模型进行仿真预测。根据式(1)~(3)以及已有文献,在Vensim PLE软件里绘制最大休耕规模流图(图2),将耕地总面积和总人口设置为状态变量,速率变量包括耕地增加量、耕地减少量、出生人口及死亡人口,适当增加辅助变量进行测算,构建出基于粮食安全的中国休耕规模系统动力学模型。



注:“<Time>”属于Vensim系统变量,用于模拟时间变化,可设置模拟的起始时间和结束时间。

Note: “<Time>” is a system variable in Vensim used to simulate temporal changes. It allows for the specification of the start and end times of the simulation.

图2 基于粮食安全的休耕规模流图

Fig.2 System flow chart of fallow scale estimation system based on food security

2.1.3 模型参数设置及多情景设定说明

模型的方程主要根据变量间的逻辑关系来确定,具有明确线性关系的变量方程可以直接根据公式输入,非线性的变量关系可以通过在Vensim PLE里设置表函数

实现。鉴于《耕地草原河湖休养生息规划(2016—2030年)》提出到2030年建立合理的休耕制度,本研究将2030年作为时间节点。参数的初始值主要以2000年对应的历史数据为准,原因在于2000年以后的数据较为完整,便于获取。变量的初始值详见表1。

表1 变量单位及初始值

变量 Variable	单位 Unit	初始值 Initial value
耕地总面积 Total cultivated land area	hm^2	128 243 000
耕地增加影响系数 Increase coefficient of cultivated land	无量纲	0.004 672 3
耕地减少影响系数 Decrease coefficient of cultivated land	无量纲	0.012 120 6
总人口 Total population	人	1 267 430 000
出生率 Birth rate	%	14.03
死亡率 Death rate	%	6.45
总播种面积 Total cultivation area	hm^2	156 299 850
粮食播种面积 Grain cultivation area	hm^2	108 462 540
人均粮食需求量 Per capita grain demand	kg	400
播种面积粮食单产 Grain yield per unit area	$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	4 261.15
复种指数 Cropping index	无量纲	1.24
粮食自给率 Grain self sufficiency rate	%	90、95、100

情景设定参考已有研究^[31],设定3类粮食自给率,分别为适度自给率90%、中度自给率95%以及高度自给率100%,以此模拟不同的发展路径。总播种面积和粮食播种面积是利用2000—2019年实际数据通过GM(1,1)模型预测得到。GM(1,1)属于一阶变量的灰色预测模型,对样本的数量以及规律性要求不高,但预测准确度较优^[35]。由于耕地增加影响系数和耕地减少影响系数的GM(1,1)模型检验模拟效果不理想,将这两个变量运用SPSS软件进行时间序列预测分析得到。出生率和死亡率参考联合国公布的《2019年世界人口展望》^[36],依据2020—2030年的中等变量预测值构建表函数。人均粮食需求量根据国家食物与营养咨询委员会的食物安全标准,2010年设置为410 kg/人,往前每年减少1单位,2010—2019年每年增加2单位,2020年后每年增加3个单位^[24]。粮食单产通过指数衰减模型预测得到。复种指数根据以往研究中测算的2001—2018年均值设置为1.24^[37]。

2.2 休耕迫切度评价体系

2.2.1 评价指标选择

休耕规模测算是从粮食安全角度对于休耕数量的约束,然而实际上休耕地的选择还需要综合考察耕地的自然条件、生态环境影响等诸多方面^[10,15-16]。因此,为了耕地三位一体保护的目标,本研究将耕地质量和生态安全作为休耕迫切度评价的关键因素,以2019年数据构建基于耕地质量与生态安全的休耕迫切度评价指标体系。耕地质量方面选取的是低等地面积占全部耕地面积比例,比例越大,说明耕地质量总体越差,如有条件应当优先

进行休耕^[38]。低等地的界定参考原国土资源部全国耕地质量等别更新评价结果，将 13~15 等地归类为低等地。生态安全方面参考的是压力-状态-响应（PSR）模型，这一模型被广泛运用于生态环境和耕地利用领域，表现出较强的学科交叉性和适用性。该模型的压力、状态、响应 3 个环节共同影响和互动，反映的是人类活动对环境的作用。PSR 模型的互动关系表现在：为了保障生存和发展需要，人类通过各种活动不断开发利用耕地资源，这些社会经济活动对耕地的生态环境造成干扰（压力），由于耕地系统结构与功能的改变，这种干扰反过来影响人类的生活和福祉（状态），导致环境恶化、自然灾害等现象，为此，人类寻求方法来缓解这些负面影响（响应），以促进人地和谐^[39-40]。由于研究区域是以省域为单元，基于易得性、代表性等选取原则，结合文献成果，最终选择了 16 个指标来衡量省域范围的耕地生态安全（表 2）。

“压力”表示的是耕地所承受的人类活动带来的生

态压力。中国耕地污染的主要成因包括化肥、农药、塑料薄膜的使用以及废水污水的影响^[41]，因此选用单位耕地化肥负荷等 4 个指标来反映农业活动所造成的耕地生态压力^[42]。水资源的空间分布失衡也是影响耕地生态安全的重要因素^[43]，故而加入单位土地资源量反映区域耕地面临的水资源压力。此外，人口与经济发展也是造成压力的原因，选择人口密度反映人口承载压力，人均 GDP 反映经济发展压力^[39]。

“状态”反映了在人类活动的影响下的耕地环境状况，当前对耕地可持续利用威胁较大的是土地沙漠化、自然灾害等^[44]，因此选择土地沙化比例和农作物受灾比例来衡量当前耕地的环境压力状态^[29,45]。除此之外，人类活动也会对耕地起到积极的改造作用，农业条件和技术的提升可以有效促进耕地粮食产量，所以用粮食单位面积产量、单位耕地农业机械化水平表征人类活动与耕地利用的积极关系状态^[42,45]。

表 2 中国省域耕地休耕迫切度评价指标体系

Table 2 The evaluation index system of the urgency of cultivated land fallow

目标层 Goal layer	准则层 Criterion layer	要素层 Element layer	指标层 Indicator layer	指标计算 Calculation	类型 Type	权重 Weight	来源 Source		
中国省域耕地 休耕迫切度 评价	耕地质量	-	低等地占全部耕地的比例	低等地面积/耕地面积	正	0.168	[38]		
			单位耕地化肥负荷	化肥施用量/耕地面积	正	0.045			
	压力		单位耕地农药负荷	农药施用量/耕地面积	正	0.076			
			单位耕地塑料薄膜负荷	农用塑料薄膜施用量/耕地面积	正	0.055			
			单位土地废水负荷	废水排放量/土地面积	正	0.146	[39, 42, 43]		
			单位土地资源量	水资源量/土地面积	逆	0.006			
			人口密度	总人口/土地面积	正	0.109			
			人均 GDP	地区生产总值/总人口	正	0.055			
			状态		农作物受灾比例	农作物受灾面积/耕地面积	正	0.060	
					土地沙化比例	土地沙化面积/土地面积	正	0.143	[29, 42, 45]
	粮食单产	-			逆	0.015			
	单位耕地农业机械化水平	农业机械总动力/耕地面积			逆	0.023			
	响应		森林覆盖率	-	逆	0.031			
			有效灌溉率	有效灌溉面积/耕地面积	逆	0.032			
			第一产业占 GDP 比例	第一产业增加值/地区生产总值	逆	0.013	[22, 29, 39, 45]		
			环境污染治理投资占 GDP 比例	环境污染治理投资/地区生产总值	逆	0.013			
			农民人均可支配收入	-	逆	0.013			

“响应”指的是人类认识到周围环境面临的问题之后对其进行反馈。耕地的生态环境遭到破坏之后，人类会采取一定手段措施进行补救，如退耕还林、水利设施修建等。因此，评价响应有效程度的指标采用的是森林覆盖率和有效灌溉率^[29,39]。在经济方面选取了第一产业占 GDP 比例、环境污染治理投资占 GDP 比例以及农民人均可支配收入进行衡量^[22,45]，通常而言，第一产业占 GDP 比例表征该区域对于耕地重视程度和对农业经济的依赖程度，环境污染治理投资占 GDP 比例反映污染防治和生态环境保护方面的投入程度，农民人均可支配收入表征农户的环境治理投入水平和地区经济发展水平，3 个指标共同反映经济方面对于耕地生态环境的响应程度。

2.2.2 指标权重确定及评价得分计算

本文采用熵值法确定指标权重，该方法有效避免了人为因素可能对评价结果的产生的偏差，是一种操作简便精度较高的客观赋权方法。指标分为两类，正向指标

表示数值越大其休耕迫切度越高，逆向指标与之相反。将数据无量纲化后计算各个指标的信息熵，计算式如下：

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (6)$$

式中 E_j 是第 j 个指标的信息熵， n 是评价省份的数量， p_{ij} 是第 j 个指标在第 i 个省份的值的占比， Y_{ij} 是无量纲处理后的值。最后计算各指标的权重（见表 2），计算式如下：

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (7)$$

式中 w_j 是第 j 个指标的权重， m 是评价指标的数量。

运用多因素综合评价法对中国各省级行政区域进行休耕迫切度评价。综合评价得分计算式如下：

$$s_i = \sum_{j=1}^m w_j Y_{ij} \quad (8)$$

式中 s_i 为第 i 个省份的休耕迫切度综合得分。

2.3 休耕指标分配

考虑到分配指标时可能存在省内休耕面积大于区域内耕地总面积的情况, 如式(9)所示, 若计算的休耕规模超过耕地总量, 则以耕地总量为休耕规模, 各省分配权重由该省的评价得分结果和耕地面积确定。分配权重计算式如下:

$$d_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (9)$$

$$T_i = \begin{cases} T \cdot d_i, & F_i > T \cdot d_i \\ F_i, & F_i \leq T \cdot d_i \end{cases} \quad (10)$$

式中 d_i 表示第 i 个省份的休耕规模分配权重。 T_i 为第 i

个省份最终的休耕规模 (hm^2), F_i 为第 i 个省份的耕地总面积 (hm^2)。

3 结果与分析

3.1 全国休耕规模仿真模型检验及情景模拟结果

将变量单位进行处理, 参数设置完毕, 模型通过大纲一致性检验。选取耕地总面积、总人口作为历史检验的变量, 将仿真预测值与2000—2019年的历史数据对比, 计算模拟相对误差, 检验模型预测拟合效果。如表3所示, 由于三调数据变更, 2019年耕地总面积模拟值与实际值存在一定误差, 其余相对误差均小于5%, 模拟效果良好, 能够进行仿真操作。

表3 耕地总面积及总人口2000—2019年检验结果

Table 3 Test results of total cultivated land and total population from 2000 to 2019

年份 Year	耕地总面积 Total cultivated area			总人口 Total population		
	实际值 Actual value/(10^4 hm^2)	模拟值 Simulated value/(10^4 hm^2)	相对误差 Relative error/%	实际值 Actual value/(10^4 people)	模拟值 Simulated value/(10^4 people)	相对误差 Relative error/%
2000	12 824.313	12 824.300	0.000	126 743.000	126 743.000	0.000
2001	12 761.581	12 761.600	0.000	127 627.000	127 624.000	-0.002
2002	12 592.960	12 592.900	0.000	128 453.000	128 447.000	-0.005
2003	12 339.221	12 339.200	0.000	129 227.000	129 219.000	-0.006
2004	12 244.426	12 244.400	0.000	129 988.000	129 978.000	-0.008
2005	12 208.267	12 208.300	0.000	130 756.000	130 743.000	-0.010
2006	12 177.587	12 177.600	0.000	131 448.000	131 433.000	-0.011
2007	12 173.520	12 173.500	0.000	132 129.000	132 113.000	-0.012
2008	12 171.589	12 169.200	-0.020	132 802.000	132 784.000	-0.014
2009	13 538.252	13 535.600	-0.020	133 450.000	133 431.000	-0.014
2010	13 526.826	13 524.200	-0.019	134 091.000	134 070.000	-0.016
2011	13 523.857	13 521.300	-0.019	134 916.000	134 892.000	-0.018
2012	13 515.844	13 513.200	-0.020	135 922.000	135 895.000	-0.020
2013	13 516.337	13 513.700	-0.020	136 726.000	136 697.000	-0.021
2014	13 505.734	13 503.000	-0.020	137 646.000	137 614.000	-0.023
2015	13 499.870	13 497.100	-0.021	138 326.000	138 291.000	-0.025
2016	13 492.096	13 489.400	-0.020	139 232.000	139 194.000	-0.027
2017	13 488.122	13 485.400	-0.020	140 011.000	139 971.000	-0.029
2018	13 499.070	13 480.300	-0.139	140 541.000	140 500.000	-0.029
2019	12 786.190	13 473.500	5.375	141 008.000	140 967.000	-0.029

通过历史数据检验后, 进行不同粮食自给率的情景模拟, 分别将粮食自给率设置为90%、95%和100%, 其余参数保持不变, 得到耕地总面积、耕地需求量以及最大休耕面积, 如表4所示, 分析在不同的粮食自给率情况下的休耕面积变化。随着时间推移, 可休耕面积总

体呈现上升趋势。相比于较为稳定的耕地总面积, 随着农业技术发展, 粮食产量的提升使得耕地压力减轻, 耕地需求量减少, 可供休耕的面积随之增加。预计在90%、95%、100%的粮食自给率下, 到2030年中国最大休耕规模分别为3 237.310万、2 678.970万、2 120.640万 hm^2 。

表4 不同粮食自给率的休耕面积模拟结果

Table 4 Simulation results of fallow scale for different self-sufficiency rates of grain

年份 Year	耕地总面积 Total cultivated area (10^4 hm^2)	耕地需求量 Cultivated land demand/(10^4 hm^2)			最大休耕面积 Maximum fallow area/(10^4 hm^2)		
		适度自给率 90% self-sufficiency rate of grain	中度自给率 95% self-sufficiency rate of grain	高度自给率 100% self-sufficiency rate of grain	适度自给率 90% self-sufficiency rate of grain	中度自给率 95% self-sufficiency rate of grain	高度自给率 100% self-sufficiency rate of grain
2019	13 473.500	10 945.600	11 553.700	12 161.800	2 527.890	1 919.800	1 311.710
2020	13 465.000	11 022.300	11 634.600	12 247.000	2 442.760	1 830.410	1 218.060
2021	13 454.900	10 964.300	11 573.400	12 182.500	2 490.580	1 881.460	1 272.330
2022	13 443.000	10 439.500	11 019.500	11 599.500	3 003.440	2 423.470	1 843.490
2023	13 429.400	10 391.400	10 968.700	11 546.000	3 038.000	2 460.700	1 883.400
2024	13 414.100	10 344.400	10 919.100	11 493.800	3 069.750	2 495.060	1 920.370
2025	13 397.200	10 301.800	10 874.100	11 446.400	3 095.410	2 523.090	1 950.770
2026	13 378.500	10 261.700	10 831.700	11 401.800	3 116.890	2 546.790	1 976.700
2027	13 358.200	10 204.900	10 771.900	11 338.800	3 153.300	2 586.360	2 019.420
2028	13 336.300	10 150.900	10 714.900	11 278.800	3 185.310	2 621.370	2 057.430
2029	13 312.600	10 099.300	10 660.400	11 221.500	3 213.330	2 652.260	2 091.190
2030	13 287.400	10 050.100	10 608.400	11 166.700	3 237.310	2 678.970	2 120.640

3.2 休耕迫切度评价结果

各省休耕迫切度评价结果如表 5 所示。休耕迫切度排名前五分别为上海、内蒙古、海南、甘肃以及青海。上海市得分高的原因在于其工业发达，废水排放量较大，单位土地废水负荷高，同时上海的第一产业占比小，经济活动对农业生产的依赖性弱，耕地休耕对经

济的影响不大；海南耕地资源相对匮乏，然而耕地开发利用强度高，耕地负荷过重，整体而言休耕的迫切度较高；其余 3 个地区位于西北，由于地处内陆，长期干旱少雨导致水资源匮乏，区域耕地质量较差，生态安全面临威胁，因此无论从质量还是生态来看都应当进行休耕。

表 5 基于休耕迫切度评价的 2019 年和 2030 年中国省域最大休耕面积
Table 5 Maximum fallow area in China's provinces of 2019 and 2030 based on evaluation of fallow urgency (10⁴ hm²)

地区 Region	得分 Score	休耕面积 Fallow area		休耕分区 Fallow classification		地区 Region	得分 Score	休耕面积 Fallow area		休耕分区 Fallow classification	
		2019 年	2030 年	2019 年	2030 年			2019 年	2030 年	2019 年	2030 年
北京市	0.043	9.350	9.350	五级	五级	湖北省	0.022	41.947	58.534	三级	三级
天津市	0.031	32.960	32.960	四级	四级	湖南省	0.024	46.149	64.398	三级	三级
河北省	0.031	59.910	83.601	二级	二级	广东省	0.032	62.246	86.860	二级	二级
山西省	0.036	69.060	96.369	二级	二级	广西壮族自治区	0.015	29.474	41.130	四级	四级
内蒙古自治区	0.063	120.107	167.602	一级	一级	海南省	0.059	48.690	48.690	三级	四级
辽宁省	0.018	35.168	49.074	四级	四级	重庆市	0.028	54.658	76.272	二级	二级
吉林省	0.016	30.358	42.363	四级	四级	四川省	0.014	27.787	38.776	四级	四级
黑龙江省	0.017	33.579	46.858	四级	四级	贵州省	0.016	30.722	42.870	四级	四级
上海市	0.093	16.200	16.200	五级	五级	云南省	0.016	30.270	42.240	四级	四级
江苏省	0.032	61.910	86.392	二级	二级	西藏自治区	0.026	44.210	44.210	三级	四级
浙江省	0.030	58.481	81.607	二级	二级	陕西省	0.034	66.163	92.327	二级	二级
安徽省	0.020	37.500	52.330	四级	三级	甘肃省	0.054	104.427	145.722	一级	一级
福建省	0.030	57.808	80.668	二级	二级	青海省	0.047	56.420	56.420	二级	三级
江西省	0.021	40.777	56.902	三级	三级	宁夏回族自治区	0.033	64.288	89.710	二级	二级
山东省	0.028	53.953	75.289	二级	二级	新疆维吾尔自治区	0.045	85.686	119.570	一级	一级
河南省	0.023	44.777	62.484	三级	三级	全国	—	1 555.036	2 087.778	—	—

四川、广西、云南、贵州以及吉林是排名靠后的 5 个地区。前 4 个省份均位于中国西南地区，四川省属于中国传统农业大省，耕地面积大，尤其是中部平原地区气候条件以及基础设施条件优越，为农业发展提供了适宜环境，休耕迫切度低。吉林位于东北地区，其农业条件较为优越，耕地质量优，生态环境良好，因此其休耕迫切度较低。

3.3 休耕空间布局结果

《国家粮食安全中长期规划纲要（2008—2020 年）》中明确提出，中国粮食自给率要稳定在 95% 以上。出于粮食安全的底线思维考虑，选择 2019 年和 2030 年 95% 粮食自给率情况下的最大休耕规模进行分配，以确定休耕空间布局。最终计算结果如表 5 所示，全国 2019 年休耕规模共计为 1 555.036 万 hm²，2030 年休耕规模为 2 087.778 万 hm²。从整体来看，各省的休耕面积将随时间增加。

根据各省的休耕面积对中国当前优化休耕空间布局进行分析，运用自然断裂点分类法以省域为单元，划分为 5 个不同等级的休耕区域，一级到五级休耕面积递减，2019 年一级到五级休耕分区的范围分别是 69.07 万~120.11 万、48.70 万~69.07 万、37.51 万~48.70 万、16.21 万~37.51 万和 9.35 万~16.21 万 hm²，2030 年一级到五级休耕分区范围分别是 96.37 万~167.61 万、64.40 万~96.37 万、49.08 万~64.40 万、16.21 万~49.08 万和 9.35 万~16.21 万 hm²，具体的分区如表 5 所示。2019 年与 2030 年结果分区结果略有差异。

2019 年和 2030 年的一级休耕区均为内蒙古、甘肃以及新疆，三地属于西北地区，生态脆弱且耕地质量不

佳，因此在休耕迫切度评价中排名靠前。同时，三地耕地面积基数较大，可供休耕的土地面积较多。受地形与气候影响，西北地区常年干旱少雨，水资源短缺使得土地荒漠化频发，植被覆盖率较低^[46]。根据 2023 年《中国水资源公报》，全国平均单位土地水资源为 2 686 m³/hm²，内蒙古的单位土地水资源仅为 416 m³/hm²，水资源匮乏。甘肃位于三大高原交汇地区，复杂的地貌和干燥的气候共同造就了其脆弱的生态环境，而不合理的生产结构以及人类活动导致其耕地利用可持续性进一步降低^[47]。新疆处于农牧交错区，土层厚度薄，土壤有机质含量较低，边际耕地较多^[48]。因此，从耕地质量和生态方面来看，一级休耕区保持较大的休耕面积是必要的。需要注意的是，该区域部分耕地尤其是近年新增耕地仅靠休耕较难改善地力，基本不适宜耕作，可以考虑退耕。

二级休耕区主要位于华北地区和东南沿海地区，2019 年和 2030 年的二级休耕区均包括宁夏、陕西、山西、河北、山东、江苏、浙江、福建、广东及重庆；此外，2019 年二级休耕区还包括青海。山西、陕西和宁夏部分区域位于黄土高原，土壤侵蚀和水土流失严重。同时，三地是中国主要煤炭产区，煤炭开采造成的土地挖损和废弃物堆积导致表土层遭到破坏、土壤污染严重^[49]。位于华北地区的河北属于资源性缺水，然而作为粮食主要产区，为了维持农业灌溉，该地长期开采地下水，形成的地下水漏斗区面积占河北平原面积的 92%，其耕地生产条件受限。东部沿海省份农业条件优良，历来是粮食主要产地，同时经济发展迅速，农业生产和工业发展的矛盾逐渐增大。这些原因促使二级休耕区的休耕规模占比较大。

三级休耕区包括河南、湖北、江西和湖南等地, 2019年还包括西藏和海南, 2030年分区还包括青海和安徽。中部地区有色金属资源丰富, 冶炼工业发展较快, 耕地存在重金属污染的风险, 如湖南省已经开展了重金属污染休耕试点。受气候影响, 西藏土壤有机质含量较低, 肥力不足, 同时其农业基础设施建设薄弱, 耕地产能不高。青海则属于西北内陆干旱区, 水资源缺乏, 土地本底条件较差, 生态脆弱。因此, 三级休耕区的规模位居前列, 区域内耕地有待休耕。

四级休耕区包括黑龙江、吉林、辽宁、天津、四川、云南、贵州和广西等地, 此外, 2019年分区还包括安徽, 2030年分区还包括西藏和海南。这些区域属于中国粮食生产区, 在保障国家粮食安全中的战略地位不容小觑。作为全国粮仓的东北地区由于长期高强度耕种, 地力有所退化。囿于数据可得性, 评价体系没能将石漠化指标纳入, 实际上, 西南地区石漠化和水土流失问题突出, 耕地质量和生态安全面临风险, 实际上也应在风险地区维持一定休耕规模。为了提升农业和耕地可持续发展水平, 这些地区需要保持适度的休耕规模。

2019年和2030年的五级休耕区均为京沪两地。北京、上海两地的经济发达, 城镇化水平高, 耕地资源稀缺, 可供休耕的耕地自然较少。五级休耕区休耕面积较小, 休耕迫切度排序靠后, 可以暂时重点休耕其他区域。

4 讨论

耕地休耕不可避免地会对当前的粮食生产造成负面影响, 因此, 需要采取一定的技术手段将适合休耕的耕地识别出来, 在确保粮食安全的同时, 合理有效配置耕地资源。从全国范围来看, 如果对每块耕地都进行考察极为费时费力, 因此在对休耕区域宏观选择时, 构建休耕迫切度评价体系, 识别当前需要休耕的省份, 科学把握休耕的整体布局和发展规模。本文将数量、质量和生态多元目标融合进休耕空间分区, 能够指导差异化休耕政策的制定, 有利于优化耕地资源空间配置, 从而保障粮食安全。

本研究预测到2030年中国的耕地面积为13 287.400万 hm^2 (19.93亿亩), 未突破18亿亩的耕地红线。其中, 95%的粮食自给率下的省域最大休耕规模为2 087.778万 hm^2 , 占比15.7%。这与已有基于国家尺度的研究结果基本一致, 例如, 梁鑫源等^[31]基于共享社会经济路径多情景的耕地保有量模型测算得到2035年之前可休耕量应控制在13.57%之内; 陈浮等^[28]模拟了多情景的休耕空间分布, 估算得到休耕面积占比为15.30%~20.57%之间。多数学者认为20%以内的休耕规模底线较为安全^[10], 整体来看, 本文的结果较为可信。相较于这些研究, 本文在全国尺度的研究中增加了省域空间分区的视角, 将耕地质量和生态安全融合入休耕规模测算中, 便于休耕分区以及差异化休耕政策的制定, 为科学确定休耕规模提供指导。

中国的休耕制度正处于建设初期, 从宏观层面对全

国的休耕区域进行识别、对休耕规模进行计算、对休耕空间布局进行优化, 是建立合理的休耕制度的前提, 也是耕地可持续发展和保障粮食安全的重要支撑。跨学科的方法和多维度的视角的深入研究尤为重要。现实世界极为复杂, 简易的休耕规模仿真模型有待进一步细化, 例如, 粮食进出口、仓储库存等都会对耕地面积产生影响, 除口粮需求外种子、工业用粮等需求也不容忽视, 而传统的耕地保有量模型未考虑这些因素。休耕迫切度评价体系也有待完善, 例如, 农户的休耕意愿是休耕政策落实的关键因素之一, 在规划休耕布局时也应将其考虑在内。此外, 以省域为评价单元的颗粒度较为粗糙, 实际上各省内部的自然环境存在较大差异, 因此, 后续可以将基于地块的微观数据可以纳入宏观尺度研究中, 为精准实施休耕提供参考, 从而促进耕地可持续利用, 保障粮食安全。

5 结论

本研究基于耕地“三位一体”保护目标, 通过系统动力学构建动态最大休耕规模预测模型, 测算出在粮食安全约束下的全国范围的最大休耕面积, 结合PSR模型, 以耕地质量和生态为评价重点, 建立中国省域的休耕迫切度评价体系, 根据评价结果进行休耕规模指标分配, 最终得到中国省域优化休耕空间布局。结果表明:

1) 预计在90%、95%、100%的粮食自给率下, 到2030年中国最大休耕规模分别为3 237.310万、2 678.970万和2 120.640万 hm^2 。同时耕地总面积为13 287.4万 hm^2 , 未突破18亿亩耕地红线。届时全面的休耕制度基本建立, 休耕制度向全国范围推广的情况下合理科学的休耕规模测算尤为重要。运用系统动力学模型, 同时以保障粮食安全为约束条件, 能够有效预测中长期范围内中国休耕面积的变化, 为休耕政策制定和精准落实提供参考, 增加决策的科学性和可操作性。

2) 以省域为单位, 基于耕地质量和耕地生态安全构建休耕迫切度评价体系, 评价结果显示, 中国的休耕迫切度水平在省域之间存在差异, 上海、内蒙古、海南、甘肃以及青海等地的休耕迫切度较高, 四川、广西、云南、贵州以及吉林等地的休耕迫切度较低。休耕的重点区域位于西北、华北以及东南沿海相关省份, 原因在于这些地区生态环境承压较大或经济开发强度高。通过休耕迫切度评价, 能够在时间上统筹优化休耕空间布局, 优先考虑休耕迫切度较高的区域。

3) 结合休耕规模测算和休耕迫切度评价结果, 计算得到在95%的粮食自给率下, 理论上中国2019年最大休耕规模为1 555.036万 hm^2 , 2030年最大休耕规模为2 087.778万 hm^2 。基于耕地“三位一体”保护目标约束的休耕分区可以分为五级, 地区之间休耕规模差异较大, 内蒙古、甘肃等地休耕规模较大, 北京、上海等地休耕规模较小。综合来看, 休耕分区为差异化休耕政策制定进行指导, 有利于优化耕地资源空间配置, 实现生产效率和生态环境的统一。

[参 考 文 献]

- [1] 吴宇哲, 沈欣言. 中国耕地保护治理转型: 供给、管制与赋能[J]. 中国土地科学, 2021, 35(8): 32-38.
WU Yuzhe, SHEN Xinyan. Governance transformation for cultivated land protection in China: Provision, regulation and enabling[J]. China Land Science, 2021, 35(8): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩杨. 中国耕地保护利用政策演进、愿景目标与实现路径[J]. 管理世界, 2022, 38(11): 121-131.
HAN Yang. The policy evolution, vision goal and realization path of China's cultivated land protection and utilization[J]. Journal of Management World, 2022, 38(11): 121-131. (in Chinese with English abstract)
- [3] GUO A D, YUE W Z, YANG J, et al. Cropland abandonment in China: Patterns, drivers, and implications for food security[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 418: 138154.
- [4] 赵晶, 成婧文, 浦男萍, 等. 休养生息制度背景下耕地保护政策体系研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 1-14.
ZHAO Jing, CHENG Jingwen, PU Nanping, et al. Research on the policy system of cultivated land protection under the background of rehabilitation system[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(9): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孔祥斌. 休养生息制度背景下的中国耕地保护转型目标框架与路径[J]. 湖南师范大学社会科学学报, 2021, 50(3): 1-12.
KONG Xiangbin. Transition objectives, contents and ways of cultivated land protection in China under the background of rehabilitation system[J]. Journal of Social Science of Hunan Normal University, 2021, 50(3): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [6] 聂英, 韩鲜籽, 王子茗惠, 等. 耕地休耕: 国外经验与中国实践[J]. 世界农业, 2022(12): 34-44.
NIE Ying, HAN Xianzi, WANG Ziminhui, et al. Fallow of arable land: Foreign experience and Chinese practice[J]. World Agriculture, 2022(12): 34-44. (in Chinese with English abstract)
- [7] 苏康传, 杨庆媛, 张忠训, 等. 中国耕地差异化休耕模式及技术措施探讨[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 283-291.
SU Kangchuan, YANG Qingyuan, ZHANG Zhongxun, et al. Investigation of differential fallow patterns and technical measures for cultivated land in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 283-291. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宋戈, 张红梅. 东北典型黑土区耕地轮作休耕的空间重构[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2231-2246.
SONG Ge, ZHANG Hongmei. Spatial reconstruction of farmland rotation and fallow in the typical blacksoil region of Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2231-2246. (in Chinese with English abstract)
- [9] HENDRICKS N P, ER E. Changes in cropland area in the United States and the role of CRP[J]. Food Policy, 2018, 75: 15-23.
- [10] 石飞, 杨庆媛, 王成, 等. 世界耕地休耕时空配置的实践及研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 1-9.
SHI Fei, YANG Qingyuan, WANG Cheng, et al. Practice and research progress on spatio-temporal collocation of fallow of cultivated land in world[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [11] SONG W, PRISHCHEPOV A V, SONG W. Mapping the spatial and temporal patterns of fallow land in mountainous regions of China[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 2148-2167.
- [12] WANG J, GUAN Y, WANG H, et al. Identifying and monitoring of abandoned farmland in key agricultural production areas on the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of the Huangshui Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120380.
- [13] 曾思燕, 于昊辰, 马静, 等. 中国耕地表层土壤重金属污染状况评判及休耕空间权衡[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1036-1047.
ZENG Siyan, YU Haochen, MA Jing, et al. Identifying the status of heavy metal pollution of cultivated land for tradeoff spatial fallow in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1036-1047. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李晓婕, 丁蓓蓓, 张雪靓. 河北省浅层地下水超采区土地休耕适宜性评价[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 990-1000.
LI Xiaojie, DING Beibei, ZHANG Xueliang. Suitability evaluation of land fallow in shallow groundwater overexploitation area of Hebei Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 990-1000. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈浮, 曾思燕, 葛小平, 等. 资源环境硬约束下中国耕地休耕优先区识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 226-235.
CHEN Fu, ZENG Siyan, GE Xiaoping, et al. Identifying the fallow priority areas of cultivated land under resources and environmental constraints in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 226-235. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾庆敏, 王雨蓉, 王晶, 等. 基于“质量-风险”的干旱区休耕空间布局及补偿策略[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 266-276.
ZENG Qingmin, WANG Yurong, WANG Jing, et al. Spatial distribution and compensation strategy of land fallow based on quality-risk in arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(20): 266-276. (in Chinese with English abstract)
- [17] 牛家恒, 江丽, 陈鑫, 等. 耕地利用强度评价方法的县域休耕适用性——以曲周县为例[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 2231-2246.

- 2019, 24(7): 156-166.
- NIU Jiaheng, JIANG Li, CHEN Xin, et al. Fallow applicability of cropland use intensity assessment methods incounty level: A case study of Quzhou County[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(7): 156-166. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5747-5763.
- SHI Fei, YANG Qingyuan, WANG Cheng, et al. Scale of the cultivated land fallow based on the emergy-ecological footprint in Songtao County, Guizhou Provice, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5747-5763. (in Chinese with English abstract)
- [19] THAPA B, CHAPAGAIN B P, MCMURRY S T, et al. Understanding landowner participation in the Conservation Reserve Program in the U. S. High Plains region[J]. *Land Use Policy*, 2024, 141: 107163.
- [20] 俞振宁, 谭永忠, 吴次芳, 等. 耕地休耕研究进展与评述[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(6): 82-89.
- YU Zhenning, TAN Yongzhong, WU Cifang, et al. Progress review on land fallow[J]. *China Land Science*, 2018, 32(6): 82-89. (in Chinese with English abstract)
- [21] PLANTINGA A J, ALIG R, CHENG H. The supply of land for conservation uses: Evidence from the conservation reserve program[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 31(3): 199-215.
- [22] 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[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 103-107.
- ZHAO Yuntai, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Simulating fallow land at regional scale: Size and spatial distribution[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 103-107. (in Chinese with English abstract)
- [23] LU D, WANG Y, YANG Q, et al. Exploring a moderate fallow scale of cultivated land in China from the perspective of food security[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(22): 4329.
- [24] 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[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(2): 9-17.
- TAN Shukui, HAN Siyu, ZHANG Lu. Study on fallow scale and dynamical simulation of major grain producing areas in China from the food security perspective[J]. *China Land Science*, 2020, 34(2): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2250-2266.
- YANG Qingyuan, BI Guohua, CHEN Zhantu, et al. Spatial allocation of fallow land in karst rocky desertification areas: A case study in Qinglong County, Guizhou Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2250-2266. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李凡凡, 刘友兆. 中国粮食安全保障前提下耕地休耕潜力初探[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(增刊): 35-41.
- LI Fanfan, LIU Youzhao. Study on the potential of cultivated land fallow under the premise of China's food security[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(Suppl.): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [27] SHI K, YANG Q, LI Y, et al. Mapping and evaluating cultivated land fallow in Southwest China using multisource data[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 987-999.
- [28] 陈浮, 曾思燕, 马静, 等. 多情景模拟休耕对中国粮食安全的影响[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(1): 90-101.
- CHEN Fu, ZENG Siyan, MA Jing, et al. The influences of cultivated land fallow on food security under different simulation scenarios in China[J]. *China Land Science*, 2023, 37(1): 90-101. (in Chinese with English abstract)
- [29] 龙玉琴, 王成, 杨庆媛, 等. 基于粮食安全与生态安全的省域耕地休耕规模测算[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 51-59.
- LONG Yuqin, WANG Cheng, YANG Qingyuan, et al. Measurement of fallowing scale of provincial cultivated land based on food security and ecological safety[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science)*, 2019, 41(1): 51-59. (in Chinese with English abstract)
- [30] 江雅婷, 赵伟, 骆佳玲, 等. 基于“极化-涓滴”理论的成渝地区双城经济圈休耕地分区研究[J]. *中国土地科学*, 2024, 38(2): 73-82.
- JIANG Yating, ZHAO Wei, LUO Jialing, et al. Study on zoning of fallow land in the Chengdu-Chongqing economic circle based on the theory of polarization and trickle-down effect[J]. *China Land Science*, 2024, 38(2): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [31] 梁鑫源, 金晓斌, 孙瑞, 等. 多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 697-713.
- LIANG Xinyuan, JIN Xiaobin, SUN Rui, et al. China's resilience-space for cultivated land protection under the restraint of multi-scenario food security bottom line[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 697-713. (in Chinese with English abstract)
- [32] 谢臻, 党昱譞, 孔祥斌, 等. SSPs-RCPs 耦合情景下我国永久基本农田划定研究[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(12): 115-127.
- XIE Zhen, DANG Yuxuan, KONG Xiangbin, et al. Research on the delineation of permanent basic farmland in China under the coupling scenarios of SSPs-RCPs[J]. *China Land Science*, 2023, 37(12): 115-127. (in Chinese with English abstract)
- [33] 朱嘉伟, 周琳琳, 谢晓彤. 单产提升潜力衰减模型法在河南粮食单产中长期预测中的应用研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1627-1638.
- ZHU Jiawei, ZHOU Linlin, XIE Xiaotong. Forecasting the

- promotion potential of grain yield per unit in mid-long term with a decay model: A case study in Henan Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1627-1638. (in Chinese with English abstract)
- [34] 董蕊, 伍国勇, 高强. 中国种植业碳补偿率时空演变与发展潜力[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2): 409-423. DONG Rui, WU Guoyong, GAO Qiang. Spatiotemporal evolution and development potential of carbon compensating rate of planting industry in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2): 409-423. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙杨, 王维成, 郎颖, 等. 基于灰色预测模型的宁夏居民健康素养水平发展趋势分析[J]. *中国健康教育*, 2023, 39(4): 315-317. SUN Yang, WANG Weicheng, LANG Ying, et al. Predictive analysis of health literacy level of Ningxia residents based on GM(1, 1) grey prediction model[J]. *Chinese Journal of Health Education*, 2023, 39(4): 315-317. (in Chinese with English abstract)
- [36] UNITED NATIONS. *World Population Prospects 2019*[R]. New York, 2019.
- [37] 李宇, 邱炳文, 何玉花, 等. 基于 MODIS 数据的 2001—2018 年中国耕地复种指数反演研究[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(11): 1874-1883. LI Yu, QIU Bingwen, HE Yuhua, et al. Cropping intensity based on MODIS data in China during 2001-2018[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(11): 1874-1883. (in Chinese with English abstract)
- [38] 关瑜, 陈影, 叶静, 等. 耕地质量多维评价与利用分区——以黄骅市为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 334-343. GUAN Yu, CHEN Ying, YE Jing, et al. Multidimensional evaluation and utilization division of cultivated land quality: A case study of Huanghua City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 334-343. (in Chinese with English abstract)
- [39] 张博胜, 杨子生. 基于 PSR 模型的中国人地关系协调发展时空格局及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 252-262. ZHANG Bosheng, YANG Zisheng. Spatio-temporal pattern and its influencing factors of coordinated development of man-land relationship in China using PSR model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(13): 252-262. (in Chinese with English abstract)
- [40] 马小宾, 章锦河, 郭丽佳, 等. 生态环境研究中压力-状态-响应模型应用的陷阱与改善[J]. *生态学报*, 2024, 44(12): 4923-4932. MA Xiaobin, ZHANG Jinhe, GUO Lijia, et al. Traps and improvements of PSR model: An eco-environmental perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 4923-4932. (in Chinese with English abstract)
- [41] 文高辉, 王夏琦, 胡贤辉, 等. 耕地规模、细碎化对化肥面源污染的影响[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2023, 31(7): 1081-1093. WEN Gaohui, WANG Xiayu, HU Xianhui, et al. Impact of cultivated land scale and fragmentation on chemical fertilizer non-point source pollution[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7): 1081-1093. (in Chinese with English abstract)
- [42] 王洋, 董晓光, 王海帆, 等. 基于 PSR-TOPSIS 模型的郑州市土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(5): 845-852. WANG Yang, DONG Xiaoguang, WANG Haifan, et al. Evaluation and obstacle factor diagnosis of land ecological security in Zhengzhou based on PSR-TOPSIS model[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(5): 845-852. (in Chinese with English abstract)
- [43] 刘畅, 江恩慧, 刘淑雅, 等. 基于绿色生产和资源协同的农业水土资源利用效率研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 369-378. LIU Chang, JIANG Enhui, LIU Shuya, et al. Agricultural water and land resources utilization efficiency based on green production and resources synergy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 369-378. (in Chinese with English abstract)
- [44] HUANG J, YU H, GUAN X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [45] 袁零, 杨庆媛. 基于 PSR 框架的甘肃省环县耕地生态安全评价[J]. *西南师范大学学报 (自然科学版)*, 2019, 44(6): 60-68. YUAN Ling, YANG Qingyuan. Ecological security assessment of cultivated land in Huan County of Gansu Province based on PSR framework[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 44(6): 60-68. (in Chinese with English abstract)
- [46] 杨振山, 张富荣, 王洪. 中国生态脆弱区的差异及绿色发展途径分析[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1071-1077. YANG Zhenshan, ZHANG Furong, WANG Hong. Analysis on the differences and its green development ways of ecologically fragile areas in China[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(6): 1071-1077. (in Chinese with English abstract)
- [47] 钟钰, 甘林针. 资源约束下西北旱区保障粮食安全的途径研究[J]. *中州学刊*, 2022(8): 42-50. ZHONG Yu, GAN Linzhen. Study on the path of ensuring grain security in northwest arid area under the constraint of resources[J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2022(8): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- [48] 李激, 何国华, 赵勇, 等. 供水工程影响下中国北方地区耕地后备资源开发潜力[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 264-274.

LI Wei, HE Guohua, ZHAO Yong, et al. Potential for exploring cultivated land reserve resources under the influence of water supply project in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(5): 264-274. (in Chinese with English abstract)

[49] 侯竟, 于昊辰, 牟守国, 等. 中国西部煤矿区土地退化时

空特征及其影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 206-216.

HOU Jing, YU Haochen, MU Shouguo, et al. Spatial-temporal characteristics of land degradation and its influencing factors in coal mine areas in Western China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 206-216. (in Chinese with English abstract)

Provincial fallow scale and fallow spatial layout of cultivated land in China from the "Trinity" protection perspective

XIONG Wenyong , MENG Fei , CHEN Hang , TAN Yongzhong^{*}

(Department of Land Management, School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Fallow land can often be implemented under the pattern of cultivated land protection on quantity, quality, and ecology in the strategy of "Storing Grain in Land" in China. The spatial arrangement of fallow land is closely linked to the fallow land implementation and the nationwide allocation of arable land resources. However, the current macro research has hindered to determine the optimal spatial layout of fallow land nationwide in sustainable agriculture at present. The purpose of this study is to explore the maximum scale and spatial layout of provincial fallow in China under the constraint of food security. The primary research subjects were selected as the provinces of China that were excluded from Hong Kong, Macao, and Taiwan. The data was derived from the publicly accessible statistical yearbooks from 2000-2019. Firstly, a numerical model was developed to calculate the fallow land scale under food security guidelines, according to the arable land retention. System dynamics, grey model, time series analysis, and exponential decay model were utilized to scientifically predict the fallow scale in China in the future. Secondly, an evaluation system was established for the urgency of fallowing arable land in Chinese provinces using the Pressure-State-Response (PSR) model, according to the land quality and ecological security. The evaluation index system was comprised of 17 specific indicators. Finally, the fallow scale of each province was allocated to determine the different fallow zones after evaluation. Therefore, a provincial space layout of fallow was established using the "Trinity" protection of quantity, quality, and ecology. The results show that: (1) The maximum fallow scale was expected to be $3\ 237.310\times 10^4$, $2\ 678.970\times 10^4$, and $2\ 120.640\times 10^4$ hectares by 2030 under 90%, 95%, and 100% grain self-sufficiency rates, respectively. At the same time, it was particularly crucial to reasonably and scientifically calculate the fallow land scale. A comprehensive fallow land system was established to promote nationwide; (2) Provincial urgency assessments show that Shanghai and Inner Mongolia were ranked the highest in the urgency for the fallow land, while Sichuan and Guangxi were ranked the lowest. Strategic allocation of fallow land was prioritized for the regions with the higher levels of urgency; (3) The scale and urgency were combined to assess the fallow land. The maximum scale of fallow land was calculated to be 15.55036 million hectares in 2019, while it was projected to be 20.87778 million hectares by 2030. The areas of each province were categorized into five levels of fallow land. There were significant regional differences in the fallow land scale. Inner Mongolia and Gansu shared the larger scales, compared with Beijing and Shanghai with the smaller ones. This finding can provide the theoretical references and technical support to establish the differentiated fallow system. Some ideas can also be offered to fully establish and effectively implement the fallow system in the future, thus integrating quantitative, qualitative, and ecological multiple objectives into the spatial zoning of fallow land.

Keywords: fallow scale; fallow spatial layout; system dynamics; PSR model; cultivated land protection