

北方农牧交错带耕地压力时空演变规律及预测

曹浩然, 孟梅

[新疆农业大学 公共管理学院(法学院), 新疆 乌鲁木齐 830002]

摘要: [目的] 研究中国北方农牧交错带耕地压力时空演变状况及空间分异状况,为北方农牧交错带未来粮食安全发展战略布局提供决策参考。[方法] 基于修正的耕地压力指数模型分析北方农牧交错带2000—2023年耕地资源状况,并细分研究区域,分析耕地压力时空发展态势,利用预测模型测算耕地压力未来变化状况,最后提出相应对策建议。[结果] ①北方农牧交错带耕地压力总体上升,在时间序列上呈现“W”形变化;空间格局呈现“整体警戒,局部平稳”的态势,压力重心随时间总体向西南迁移;②区域耕地压力异质性呈逐渐分异趋势,受区域功能及产业结构发展的影响,时间格局上呈现异质性逐渐明显的趋势,空间格局分布上呈现出“长城沿线沙化地区长期稳定,黄土丘陵沟壑地区逐渐上升,京津冀水源涵养地区平缓下降”的特征;③未来7a北方农牧交错带耕地压力呈现整体升高态势,对粮食安全及区域发展构成一定威胁,需引起有关部门的保护及重视。[结论] 北方农牧交错带耕地压力总体呈上升趋势,且区域内差异逐渐明显,未来应提高全域耕地地力及环境整治能力,开展跨区域耕地保护补偿机制。

关键词: 耕地压力指数;粮食安全;预测模型;北方农牧交错带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0394-11

中图分类号: F323.211

文献参数: 曹浩然, 孟梅.北方农牧交错带耕地压力时空演变规律及预测[J].水土保持通报,2024,44(4):394-404.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.040; Cao Haoran, Meng Mei. Spatio-temporal evolution of cultivated land pressure and its countermeasures in northern agro-pastoral ecotone in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):394-404.

Spatio-temporal Evolution of Cultivated Land Pressure and Its Countermeasures in Northern Agro-pastoral Ecotone in China

Cao Haoran, Meng Mei

[School of Public Administration(Law School), Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830002, China]

Abstract: [Objective] The spatio-temporal evolution and spatial differentiation of cultivated land pressure in the agro-pastoral ecotone of Northern China was analysed, in order to provide reference for the future strategic layout of food security development in this ecotone in Northern China. [Methods] The status of cultivated land resources in the northern agro-pastoral ecotone was analysed between 2000 and 2023 using the modified cultivated land pressure index mode. Thereafter, the study area was subdivided, and the spatiotemporal development trend of cultivated land pressure was analysed. The future change in cultivated land pressure was calculated using the prediction model, and corresponding countermeasures and suggestions were proposed. [Results] ① In general, the cultivated land pressure in the northern agro-pastoral ecotone increased, showing a “W” shape change in time series. The spatial pattern showed an “overall” alert and local stable situation, and the pressure centre of gravity migrated towards the southwest with time. ② The heterogeneity of regional cultivated land pressure showed a gradual trend of differentiation. Further, the heterogeneity was influenced by the development of regional functions and industrial structure and showed a gradual but evident trend in the time pattern. The spatial pattern distribution showed that the desertification area along the Great Wall was stable for a long time, the loess hilly gully area was gradually rising, and the

收稿日期:2024-03-09

修回日期:2024-05-12

资助项目:国家自然科学基金项目“基于人口—产业—土地视角下的城镇化碳排放及其治理机制研究:以新疆天山北坡城市群为例”(71663052)

第一作者:曹浩然(2000—),女(汉族),安徽省阜阳市人,硕士研究生,研究方向为耕地保护粮食安全。Email:3102366696@qq.com。

通信作者:孟梅(1973—),女(汉族),新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事农业经济方面研究的研究。Email:785161662@qq.com。

Beijing-Tianjin-Hebei water conservation area was gently declining. In the next 7 years, the pressure of cultivated land in the northern agricultural and pastoral ecotone will show an overall increase, posing a certain threat to food security and regional development, which needs to be protected and paid attention to by relevant departments. [Conclusion] The cultivated land pressure in the northern agro-pastoral ecotone zone is on the rise in general, and the regional differences are gradually obvious. In the future, it is necessary to improve the land fertility and environmental political ability of the whole cultivated land, and carry out the compensation mechanism of cross-regional cultivated land protection.

Keywords: cultivated land pressure index; food security; prediction model; northern farming-pastoral ecotone

一个国家或地区耕地资源的数量及质量,是影响该国或该地区过去及未来发展的重要因素,其变化也影响着粮食供给能力与粮食安全水平。中国用不到世界 10% 的耕地,供养了全球 22% 的人口^[1],为世界粮食安全保障做出巨大贡献。但长期耕地的高强度利用,导致耕地内部生态系统功能缺失、土壤板结化及次生盐碱化加剧,耕地压力日益增加。目前学界将耕地压力定义为:区域内耕地资源承压及紧张程度,反映区内人均最小耕地需求与实际人均耕地的差异^[2]。在耕地压力方面,国内外学者均已取得较为丰富的成果。国外学者对于耕地压力的研究主要集中于土地承载力的计算方面,压力与承载力相互依存,耕地承载力是耕地压力的基础。1949 年 William Allen^[3]在《生存之路》一书中,就以粮食为制约条件,提出土地资源的承载力的计算方法: $C(\text{土地承载力}) = B(\text{生物力}) : E(\text{环境阻力})$ 。William Allen^[4]提出的土地承载力模型可以计算出一定时间段内,区域土地生产粮食所能供养的总人数,但该计算方法没有把人口对农业生产产生的反馈效应进行考虑,只能用来粗略估计某个地区的土地在可预计的时期内所能持续供养的人口数量。20 世纪 80 年代,英国科学家 Malcolm Slesser 提出(ECCO)模型,并在肯尼亚,毛里求斯和赞比亚得到成功应用,该模式基于系统动力学的思想,把承载力研究与可持续发展策略有机地结合起来,对人口,资源,环境发展进行综合测度^[5]。国内的研究主要集中在压力指标的计算、影响因素的分析和压力指标的预测上。首先,在耕地压力测算研究中,郑海霞等^[6]构建的标准耕地系数模型和蔡运龙等^[7]构建的耕地压力指数模型被广泛应用。二者将区域内耕地资源紧张状况及保护阈值较好地反映出来,为后人研究提供耕地质量的测算方法与粮食安全的衡量标准。多数学者将耕地压力与粮食产量^[8]、粮食进出口贸易^[9]进行关联分析;也有部分学者探讨其与城市化发展^[10]、社会经济增长等^[11]内在关联,得出耕地压力重心与经济重心移动轨迹存在着路径一致的现象。其次,学者们^[12]对耕地压力影响因素深入剖析,普遍认为耕地压力受自然、经济与社会等多

方面因素影响,其中城市化水平、农民收入、产业结构、粮食单产等为主要驱动因素。最后,在预测耕地压力指数时,学者们大多采用灰色预测 GM(1,1) 模型^[13]、线性自回归预测模型^[14]及组合模型预测等^[15]方法,普遍认为未来耕地压力的变化与未来科技投入、耕作方式有着较大关联,应提高复种指数,增强农业技术水平,减缓未来耕地压力的增长。研究尺度上,研究者多从全国宏观尺度^[16]及省城市县微观尺度^[17-18]开展研究,而对中尺度(如北方生态脆弱带)的耕地压力研究则相对薄弱。

北方农牧交错带位于中国北方传统农区与畜牧区的过渡发展地带,带内有中国重要的粮食主产区与重点生态功能区。因此,研究北方农牧交错带内耕地压力变化及预测未来发展趋势,对于保证带内的粮食产量及其稳定增长,实现区域生态系统服务的可持续供应具有十分重要的意义。本文基于北方农牧交错带 2000—2023 年耕地资源质量及数量变化情况,在此基础上,本研究拟从区域尺度上研究耕地压力的空间分布规律,并在此基础上,引入重心模型和总体分异度模型进行深入研究,最终通过灰色-BP 神经网络的预测方法,更加精确地反映出未来的变化趋势,为中国北方农牧交错带未来粮食安全发展战略布局提供决策参考。

1 研究区概况及耕地资源演变状况

本研究依据 2016 年农业农村部发布的《农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见》^[19]为基准确定研究区区位,在行政区划上涉及 7 省(区)的 145 个县(市、旗、区),位于 $34^{\circ}35' - 45^{\circ}30' \text{N}$, $102^{\circ}55' - 123^{\circ}28' \text{E}$ 之间,区域总面积约 $4.61 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。北方农牧交错带位于中国半湿润区与半干旱区的过渡区域,年均降水量为 300~450 mm,年际干湿波动明显,蒸发强烈。由于地处第二阶梯与第三阶梯交界区域,该区地貌类型复杂多样,以高原、山地为主。多年的严重开垦及超载放牧,使得带内土地沙漠化急剧发展,贺兰山以东的北方农牧交错带半干旱地区,其土地沙化年际增长率为 1.39%^[20],同时,耕地的持续开

垦导致当地的农业用水大量激增,出现河流断流、地下水位下降等一系列问题。国家自 2000 年开始在北方农牧交错带实行退耕等耕地保护策略,具体覆盖范围为长城沿线沙化退化地区、京津冀水源涵养地区、黄土丘陵沟壑地区。作为北方农牧交错带的重要产业,农业对当地经济发展起到支撑和引导作用,但耕地面积处于逐年减少的状态,年递减率为 0.33%,耕地流失问题亟待解决。以 2004, 2008, 2012, 2016, 2020 年为时间节点划分为 6 个时间段反映该区域耕地资源变化状况(图 1)。①2000—2008 年为耕地流失高峰期,2000—2004 年耕地减少 $5.80 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年递减率为 0.6%,2004—2008 年耕地减少 $5.20 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年递减率为 0.51%。2000 年至此后 8 a,在我国实施了一系列的退耕还林还草生态建设项目,北方农牧交错区的耕地面积急剧减少。国家大力推行退耕还林还草生态建设工程,北方农牧交错带耕地锐减。同时,城镇化的快速发展,大量非农建设用地对耕地的侵占,也是导致该区域耕地大幅下降的重要原因。②2009—2023 年为耕地平稳期,2009—2012 年北方农牧交错带耕地递减率出现低于全国耕地递减率的趋势,2013—2023 年耕地数量趋于稳定,递减率逐渐降低并稳定在 0.07% 左右。

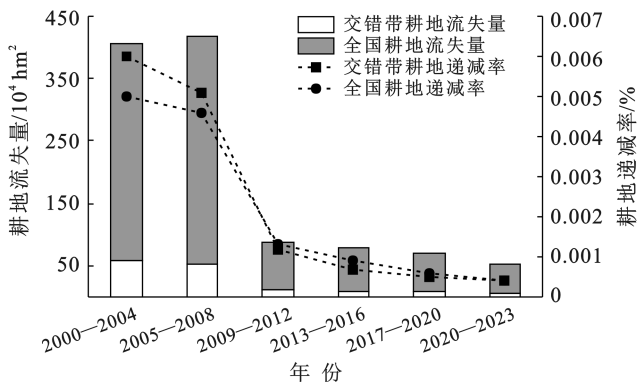


图 1 耕地流失量与耕地递减率

Fig.1 Loss and decline rate of cultivated land

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文的耕地面积数据来源于 2000—2023 年《中国统计年鉴》和《县域统计年鉴》;播种面积、产量、人口等数据来源于 2000—2023 年《中国农村统计年鉴》和《县域统计年鉴》;个别缺失数据由社会发展统计公报及插值法补充。由于研究期内涉及行政区划调整,山西省大同市南郊区于 2018 年撤销并归入云岗区,因而本文以 2019 年行政区划为基准,将各年份县域单元均处理为 145 个有效县域单元。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地压力指数模型 本文借鉴蔡运龙^[7]基于区域最小耕地面积研究提出的最小压力指数模型进行研究:

$$K_0 = \frac{S_{\min}}{S} = \frac{\beta \times G_r}{S \times y \times q \times m} \quad (1)$$

$$K = \frac{K_0}{\sigma} = \frac{K_0}{y_i \times m_i / y_n \times m_n} \quad (2)$$

式中: K , K_0 分别为耕地压力指数和标准耕地压力指数; S_{\min} , S 分别为最小人均耕地面积与实际人均耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$); β 为粮食自给率; G_r 为人均粮食需求量($\text{kg}/\text{人}$); y 为粮食单产(kg/hm^2); q 为粮作比; m 为复种指数; σ 为标准耕地系数。

根据对于耕地压力的含义剖析,将耕地压力值分为 5 级^[21]: 无压力($K \leq 0.9$)、警戒压力($0.9 < K \leq 1.1$)、低压力($1.1 < K \leq 1.5$)、中压力($1.5 < K \leq 3$)、高压压力($K > 3$)。粮食自给率是评价一个国家粮食安全的重要指标,当代大部分学者认为我国粮食已实现自给自足,达到粮食自给率 100% 的水平。但不同时期不同地区粮食供需水平不同,将该值赋值为 100% 会出现失真状况。因此,本文参考张利娅^[22]的中国粮食自给率计算方法。人均粮食需求量是计算区域粮食需求、制定保障粮食安全相关政策时的基础性指标。1986 年中国农科院将我国人均粮食需求量定为 400 $\text{kg}/\text{人}$ 。本文参考朱洪波^[21]、崔宁波等^[23]人均粮食需求设定方法,将值定位在 5 个区间内: 2000—2003 年为 400 kg , 2004—2008 年为 410 kg , 2009—2012 年为 420 kg , 2013—2016 为 430 kg , 2017—2020 为 440 kg , 2021—2024 为 450 kg 。最小人均耕地面积受到粮食自给率、粮食单产、粮作比、复种比、人均粮食需求量等多种变量影响,是一个国家和地区保障粮食安全的最低底线。但蔡运龙^[7]的研究较少考虑到区域间的差异,由此本文引入标准耕地系数 σ ^[24],进而对区域耕地进行差异化评估。

2.2.2 重心转移模型 重心转移模型用以研究耕地压力重心空间的转移及移动规律^[25],计算公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \quad (4)$$

$$D = W \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2} \quad (5)$$

式中: X , Y 为耕地压力指数重心坐标; n 为行政单元个数; k_i 为 i 省份耕地压力指数; D 为由 b 时期到 a 时期的耕地压力重心移动距离; W 为常数,取值 111.111(km)。

2.2.3 总体分异测度指数 总体分异测度指数用于评估北方农牧交错带耕地压力的整体分异情况和离

散变化程度^[26]。计算公式为:

$$GDI = j_1 C_V + j_2 T + j_3 GE + j_4 A \quad (6)$$

$$C_V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} / \mu \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\mu} \ln \frac{x_i}{\mu} \quad (8)$$

$$GE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\mu}{x_i} \quad (9)$$

$$A = 1 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^{1-\epsilon} \right]^{\frac{1}{1-\epsilon}} \quad (10)$$

式中:GDI为总体分异测度指数; C_V 为变异系数; T 为泰尔指数; GE 为总熵指数; A 为阿特金森指数; j_i 为第*i*个空间分异指数权重,通过熵值法确定; x_i 为*i*区域的耕地压力指数; μ 为区域压力指数平均值; ϵ 为空间差异灵敏系数,常取值为0.5。

2.3 灰色-BP神经网络预测

灰色预测GM(1,1)属于灰色数列预测中具有较强普适性的模型,其本质是将原始的时间序列通过转换产生新的数列,再由整理过的数据列构建模型,并对目标对象未来的发展趋势进行预测^[27]。但是,单个灰色模型难以综合考虑多因子特征,而采用单一BP神经网络预测容易忽视耕地压力时序线性关系,导致预测效果不够稳定^[28]。2002年,李斌等^[29]运用灰色-神经网络组合模型对于城市用水量进行预测,发现该组合模型提高原有单个模型预测的精度,更加适用于实际。

(1) 建立灰色预测模型,对145个县域原始耕地压力序列记 $X^{(0)}(i)$, ($i=1,2,3 \dots 145$)进行预测,得到:

$$X^{(1)}(i+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ai} + \frac{u}{a} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X^{(0)}(i+1) &= X^{(1)}(i+1) - X^{(1)}(i) \\ &= (1 - e^a) \left(X^{(1)}(0) - \frac{\mu}{a} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $X^{(1)}(i+1)$ 为累加生成数列; $X^{(0)}(i+1)$ 为原始数列; $X^{(0)}(1)$ 为原始数列初始值; a 为发展灰数,反映原始数列及其初始值的发展趋势; u 为内生控制灰数,反映数据间的变化特征。

(2) 将残差序列 $W_i = X^{(0)}(i+1) - X^{(0)}(i)$ 输入BP神经网络,输入层节点数为5,根据BP神经网络隐含层节点公式,得出隐含层节点数为4,输出层节点数为1,隐含层与节点层采用sigmoid函数,tansig函数用作模型训练,其中最大迭代次数为1000,目标精度0.000001,学习率为0.1,得到残差修正序列 R_i 。

(3) 通过对残差修正序列 R_i 与灰色模型预测序列 $X^{(0)}(i+1)$ 进行迭加,获得灰色-BP神经网络组合预测模型序列 C_i 。

3 结果与分析

3.1 耕地压力时空演变特征分析

3.1.1 耕地压力时空演变整体特征分析 在生态文明建设与耕地保护的制约下,北方农牧交错带耕地压力状态整体呈现“W”形变化(图2),前中期波动较大,后期较平缓,多数年份处于“低压力”状态。在空间上,全域耕地压力呈现出“两降两升”的变化规律。2000—2009年,耕地压力指数由2000年的1.31增至2009年的1.69,总体增幅为29%。21世纪以来,全国耕地资源锐减,各地将经济建设作为发展重点,建设用地急速扩张。与此同时,各地积极响应退耕还林还草还湖号召,大量耕地转为生态用地^[30]。

经济建设与耕地需求矛盾的增长不断威胁粮食安全,基于此,国家出台“用地增减挂钩”“三位一体耕地保护”等最严格的耕地保护政策,用以遏制不断恶化的耕地势头。2014年,耕地压力由2009年的1.69下降至1.28,但2016年农业农村部印发的《关于促进牧草业发展的指导意见》,以及通过的《关于加强北方农牧交错带草原保护和利用政策的提案》,均明确加强将草产业、草食畜牧业作为该区域农业结构调整的主攻方向,贯彻落实“粮经饲统筹发展”的方针政策。2017年后,全区耕地压力呈现缓慢上升趋势,且进入经济转型发展关键时期,“乱占耕地”开发建设现象频出,耕地资源呈现紧缺现象。同时也存在着三调的调查数据更细致,反映出的问题更加全面显著的问题。2020年后,全区耕地压力呈缓慢增长趋势,处于“中压力”区域,生态退耕压力及频繁的自然灾害不断制约区域农业发展,如2023年的甘肃、宁夏等西北地区的特大干旱灾害,使当地粮食单产锐减,耕地压力持续走高。

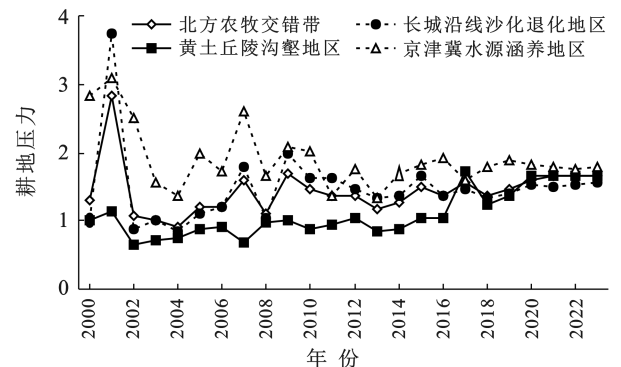


图2 北方农牧交错带及其3区域2000—2023年耕地压力变化

Fig.2 Changes of cultivated land pressure in northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2023

3.1.2 耕地压力时空演变区域差异分析 北方农牧交错带涵盖3个区域:长城沿线沙化退化地区、京津冀水源涵养地区、黄土丘陵沟壑地区。从整体上看,耕地高压区集中在东北部、中部(内蒙古自治区、河北省)及西南部(宁夏回族自治区),无压力区域及警戒压力区主要分布在南部区域(甘肃省)。长城沿线沙化退化地区,区域干旱少雨、草原退化及耕地沙化问题严重,粮食产量较低。随着“西部大开发”战略的推进,加大该区耕地承载负荷,该区耕地压力走势为前期起伏较大,后期较平缓,总体与北方农牧交错带耕地压力走势一致,区域耕地质量较差,农业现代化水平技术较低,为北方农牧交错带粮食单产冷点区^[31],耕地利用程度较其他两区域低,因此除2004年区域耕地压力处于警戒压力状态,其余年份总体呈现“低压力”状态。

京津冀水源涵养地区,位于内蒙古高原与华北平原过渡带上,地貌类型多样,自然环境脆弱、自然灾害频发^[32]。作为国家重点发展地区,“用地热”“开发热”现象频生,非农建设用地增长较快,特别是2002年后开展京津风沙源治理工程,大量坡耕地转为林地、草地,耕地压力总体较高,年均值为1.93,处于“中压力”状态,也是北方农牧交错带耕地压力平均提速最快的地区,尤其在2004—2009年年均增长14.4%,粮食安全保障水平面临巨大挑战。

黄土丘陵沟壑地区,是国家重点水土保持生态功能区和我国传统农业区,农耕历史悠久,农业生产基础较好,如何平衡粮食生产与生态保护是区域应重点

关注的问题。该地大部分地区位于毛乌素沙地地区,生态环境较为恶劣,植被盖度低,干旱频发,土地细碎化程度严重,对当地农业发展有一定限制性。该地虽平均压力处于“警戒压力”状态,但耕地压力依然存在着较大的地域分异性,整体呈现西高东低状态。近年来耕地压力如宁夏回族自治区同心县、海原县、盐池县等高海拔地区常年属于高压区,而甘肃省、陕西省等低海拔区常年处于无压力状态。这些区域自然条件较好,农业现代化水平较高,但压力水平差距较大,推测存在休耕、退耕等耕地保护政策因素及不同区域农民化肥农药使用程度等社会因素影响。

以2004,2008,2012,2016,2020年作为时间节点,将2000—2023年耕地压力进行可视化表达(图3)。由于受到自然、社会和经济等多种因素的影响,中国北方农牧交错区耕地压力具有显著的空间异质性和“两头低—中间高”的分布格局。长城沿线沙化地区(如内蒙古自治区、辽宁省)与黄土高原丘陵沟壑区(陕西省)大部分县市表现出明显的耕地压力下降趋势,京津冀水源涵养地区总体压力上升,年压力均值为2.22,耕地流失严重,处于明显的中压力状态。2000—2004年,国家开展的退耕还林工程集中在华北地区且处于初期阶段,规划工作具有一定的滞后性。2004年后耕地压力整体呈现由东北—西南逐步转移增高的态势,2008年后,耕地高压地区主要分布在全区中部及西南部,但仍呈现出“总体高压、局部稳定”态势,北方农牧交错带耕地保护刻不容缓。

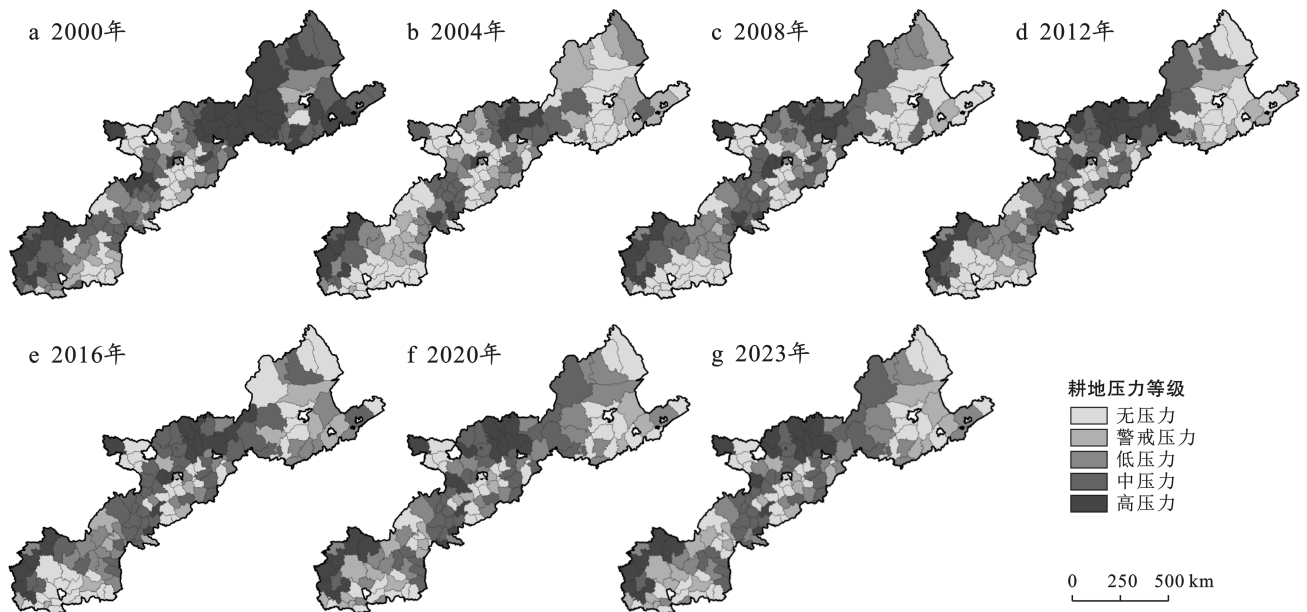


图3 2000—2023年北方农牧交错带耕地压力时空演变格局

Fig.3 Spatial and temporal evolution pattern of cultivated land pressure in northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2023

3.2 耕地压力重心移动规律

2000—2023 年,北方农牧交错带耕地压力重心分布在区域中部,且整体呈现向西南迁移趋势(图 4),其中向西经移动 1.46°,向南纬移动 2.48°。耕地压力重心沿着“西南—东北—西南—西南—东北”轨迹共迁移 486.957 km,区位上,由山西省东北部逐步转移到陕西省东北部。反映出山西省东北部耕地压力渐缓,粮食生产能力逐渐提高的态势。21 世纪初,随着国家政策逐渐由中西部倾斜,忻州市经济开发区设立,吸引省内劳动力由省内西南方向转移。2010 年,太原经济区横空出世,省内经济重心不断向西南方向转移。受经济建设,城市建设扩张的影响下,山西省耕地压力重心随着省内经济重心的偏移也随之发生变化。位于黄土丘陵沟壑地区的陕西省东北部耕地压力呈现明显升高态势。

3.3 耕地压力空间分异规律

北方农牧交错带及各区域耕地分异测度指数和水平压力差异指数的计算结果显示,GDI 指数呈现逐步上升趋势,2000—2023 年北方农牧交错带耕地压力空间分异总体呈现扩大趋势,这是因为带内粮食主产功能区逐渐明晰,耕地投入产出差异逐渐显著,耕地资源压力分异格局逐渐明显。区域尺度上呈现

出与耕地压力指数变化相似的趋势,3 部分区域皆为前期波动明显,中后期较平缓的变化趋势。长城沿线沙化退化地区空间分异趋势与北方农牧交错带空间分异大体上趋势相同,总体呈现上升趋势。黄土丘陵沟壑地区在 2000—2008 年上升趋势较其他区域更为显著,而京津冀水源涵养地区呈现“前期上升、中期平稳、后期下降”的态势,该区作为重点开发区域且空间跨度较小,区内功能发展较为一致,空间分异趋缓。

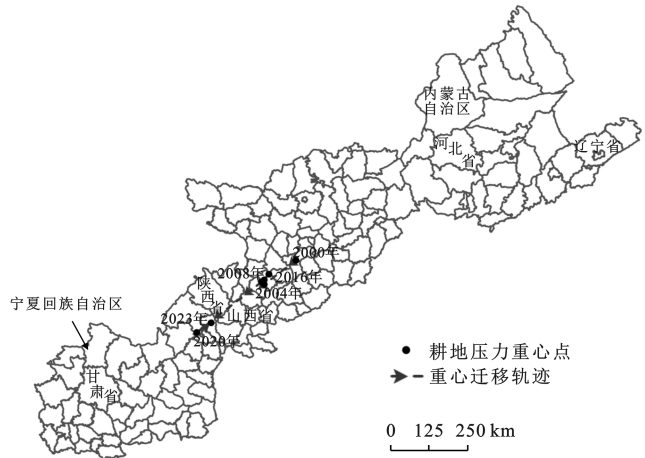


图 4 2000—2023 年北方农牧交错带耕地压力重心及迁移轨迹
Fig.4 Center of gravity and migration trajectory of cultivated land pressure in northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2023

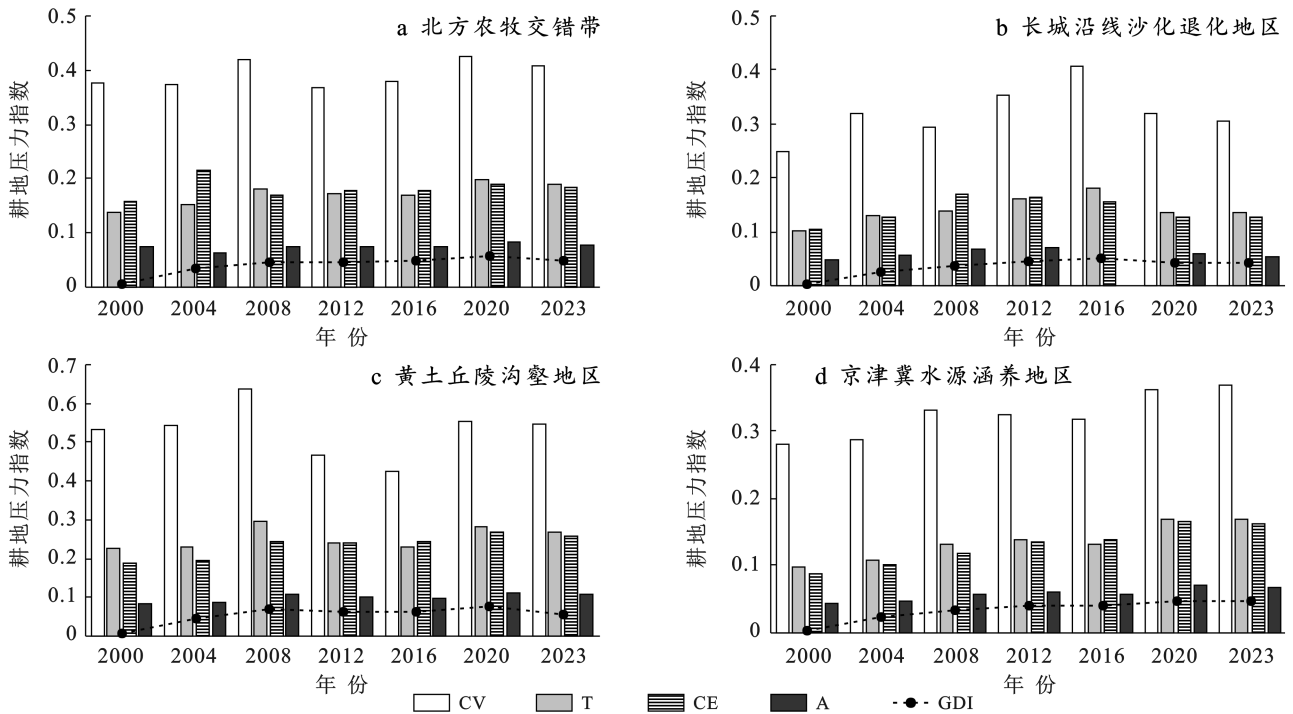


图 5 2000—2023 年北方农牧交错带及其 3 区域耕地压力分异状况

Fig.5 Pressure differentiation of cultivated land in northern agro-pastoral ecotone from 2000 to 2023

3.4 耕地压力趋势预测分析

本研究选取北方农牧交错带 3 区域 145 个县域 2000—2023 年耕地压力指数作为样本数据进行计

算,比较灰色 GM 模型预测值与灰色-BP 神经网络模型预测值与实际值。灰色模型针对少量数据的短期预测,因此两种方法分别以 2000—2020 年数据作为训练

样本、2021—2023 年数据作为测试样本进行分析。

3.4.1 灰色-BP 神经网络预测 将各区域 2000—2020 年的耕地压力指数作为原始序列 $X^{(0)}(i+1)$ ($i=1,2,3\cdots 145$), 建立灰色预测模型, 对原始数列进行一阶累加生成新的数列 $X^{(1)}(i+1)$ 。由 Matlab R2022 年计算得到整体及区域数据灰色预测模型的微分方程参数, 推导出时间响应公式及预测方程式。对北方农牧交错带耕地压力建立灰色预测模型:

$$X^{(1)}(i+1) = -250.6116e^{0.0059t} + 251.9189 \quad (13)$$

通过对模型进行后验差比值 C 检验及小误差概率 p 检验, 获得后延差比 $C=0.07629 < 0.35$, 小误差概率 $p=1$, 依据表 1 精度检验登记指标表^[33], 得出模

型精度检验较高, 检验合格。同理, 对 3 区域耕地压力数据进行计算, 拟合计算出 2018—2020 年北方农牧交错带及其 3 区域耕地压力指数的灰色模型预测结果(表 2)。

表 1 灰色预测模型精度检验等级对照表
Table 1 Comparison table of accuracy test level of grey prediction model

精度等级	小误差事件概率	均方差比值
I (好)	$p \geq 0.95$	$C \leq 0.35$
II (合格)	$0.8 \leq p < 0.95$	$0.35 < C \leq 0.5$
III (基本合格)	$0.7 \leq p < 0.8$	$0.35 < C \leq 0.5$
IV (不合格)	$p < 0.7$	$C > 0.65$

表 2 2021—2023 年北方农牧交错带耕地压力指数灰色预测结果

Table 2 Grey prediction results of cultivated land pressure index in northern agro-pastoral ecotone from 2021 to 2023

地区	2021 年		2022 年		2023 年	
	真实值	预测值	真实值	预测值	真实值	预测值
北方农牧交错带	1.460 87	1.426 8	1.492 7	1.495 7	1.565 9	1.520 6
长城沿线沙化退化地区	1.361 5	1.346 8	1.406 5	1.375 8	1.467 5	1.390 8
黄土丘陵沟壑地区	1.376 2	1.358 7	1.364 8	1.360 2	1.465 3	1.497 9
京津冀水源涵养地区	1.644 9	1.574 9	1.706 8	1.631 1	1.764 9	1.673 1

为增加模型预测精度, 利用 BP 神经网络对于灰色预测模型进行残差修正。为进一步验证灰色-BP 神经网络组合模型的预测结果, 本文采用绝对误差 (MAE, Mean absolute error) 和均方根误差 (RMSE,

Root mean square error) 分别分析该组合模型的误差及稳定性, 误差结果详见表 3。由此, 本研究有理由验证说明灰色-BP 神经网络预测模型可对北方农牧交错带的耕地压力进行短期预测。

表 3 2021—2023 年北方农牧交错带耕地压力指数预测对比结果

Table 3 Comparison results of cultivated land pressure index prediction in northern agro-pastoral ecotone from 2021 to 2023

地区	灰色预测				灰色-BP 神经网络预测			
	C	p	MAE	RMSE	C	p	MAE	RMSE
北方农牧交错带	0.221	1	0.546 7	0.664 5	0.085 6	1	0.254 7	0.356 3
长城沿线沙化退化地区	0.347	1	0.846 7	1.247 7	0.036 3	1	0.278 6	0.467 5
黄土丘陵沟壑地区	0.319	1	0.143 5	0.138 6	0.093 4	1	0.037 6	0.076 4
京津冀水源涵养地区	0.316	1	0.576 7	0.675 6	0.157 9	1	0.135 6	0.195 6

3.4.2 耕地压力指数预测分析 通过对灰色 GM(1, 1) 模型的预测值与灰色-BP 神经网络的联合预测值及实际值(图 6)进行了对比。可以看到, 灰色模型的预测值总体上是一条比较光滑的线, 能够反映出耕地压力的总体变化趋势, 但是并不能很好地反映出耕地压力的短期变化。而通过人工神经网络的组合模型, 可以更准确地反映出耕地压力的变化情况, 并且与实际情况相差不大, 从而极大地提高了预测的准确性。

图 7 为北方农牧交错带及各区域 2024—2030 年耕地压力指数预测结果。北方农牧交错带耕地压力处于低压至中压状态, 压力指数在“1.5”左右浮动, 总

体呈现增长趋势。伴随北方农牧交错带农业“以养定种”的粮改饲生产结构调整, 未来该地大力将粮食—经济作物的二元结构调整粮食—经济—饲料作物的三元结构, 引导发展草食畜牧业, 对未来的粮食作物生产构成用地资源方面的挑战, 需引起重视并采取相应防范措施。随着城市化进程的加快, 实际人均耕地面积的紧缩发展趋势及耕地质量的日益下降, 2024—2027 年各区域耕地压力总体呈现增长趋势。其中黄土丘陵沟壑地区增速最快, 整体压力明显大于京津冀水源涵养地区与长城沿线沙化退化地区。2027—2030 年各区域耕地压力又呈回落趋势, 随着

农业现代化技术不断提升以及生态工程的“时间效应”得以凸显,在未来几年中耕地压力有所下降,但整体耕地压力并未得到有效缓解。

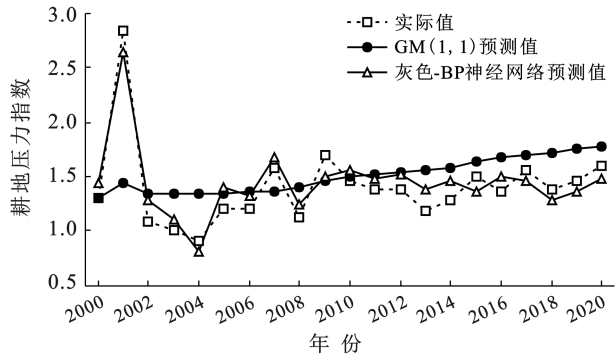


图 6 耕地压力实际值与预测值变动状况

Fig.6 Changes of actual and predicted cultivated land pressure

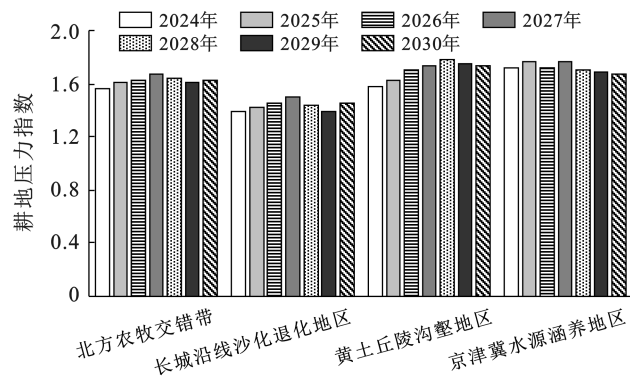


图 7 北方农牧交错带及其 3 区域 2024—2030 年耕地压力指数预测变化

Fig.7 Forecast change of cultivated land pressure index in northern agro-pastoral ecotone from 2024 to 2030

4 结论

(1) 北方农牧交错带耕地压力整体呈现波动上升趋势,耕地压力在低压力区与中压力区间徘徊,时空分布特征表现为 W 形变化,空间格局呈现出“整体警戒,局部稳定”的态势,其压力重心随着时间的推移,从东北整体向西南方向移动。

(2) 县域间耕地压力总体上呈现出逐步分化的特点,整体 GDI 指数呈倒 V 形分布。耕地压力指数区域空间上呈现出“长城沿线沙化地区长期稳定,黄土丘陵沟壑地区逐渐上升,京津冀水源涵养地区平缓下降”的特征,其中黄土丘陵沟壑地区变化较明显,耕地压力呈恶化趋势;长城沿线沙化地区耕地面积基数较大,区内具有中国“四大沙地”之一的毛乌素沙地,区内积极开展生态退耕,压力起伏波动较大;京津冀水源涵养地区整体压力较高,区域分异较小。

(3) 在严格的耕地保护制度实施下,未来 7 a 带

内耕地压力并未得到缓解,呈现总体增高的势头,对粮食安全及西部地区经济发展构成一定威胁,需对此进行充分关注。

5 讨论与对策

5.1 讨论

(1) 不同地区耕地压力受自然环境、社会经济及地方政策等因素影响可能会存在随时间变化具有不同趋势走向的状况,但均呈现耕地压力指数随时间变化异质性逐渐显著的状况^[34],这与社会经济建设发展及土地整治工程的逐步推进,土地功能逐渐明晰有关。

(2) 由于“国土二调三调”对于地类的界定、技术方法、坐标系等存在差异,因此本文对于衔接数据的修正转换方面需进一步进行分析。

(3) 耕地具有供给、仓储、调节、景观等多种功能,本文对于耕地压力的界定限于耕地的生产供给层面,且耕地压力受到经济、社会、生态等多方面因素影响,随着“藏粮于地”战略的提出,涵盖着土壤质量、生境质量及管理质量等多维度的耕地质量也应作为衡量耕地压力的重要因素之一。因此本文可构建评价耕地质量的评价指标体系,将耕地质量及土地生态指标作为耕地压力模型的修正因素,以响应耕地的多功能性。

(4) 可进一步对北方农牧交错带耕地压力驱动因子进行分析,由于 3 区域地理环境、种植结构及经济发展水平等差异,考虑选择区域间共有驱动因子,如土壤有机碳含量、农民年均收入、城镇化发展水平等,探索不同区域内耕地压力主要驱动因子,进一步细化对策建议;同一区域内同样存在耕地压力空间异质性(如黄土丘陵沟壑地区),后续可缩小研究区域进一步对其成因进行探讨。

(5) 本文的粮食产量数据来源于北方农牧交错带各县市的统计数据,粮食范围按照国家统计局标准进行划定,主要包括稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类及其他杂粮等,但随着经济发展居民生活水平的日益提升以及“大食物观”的提出,我国居民人均肉蛋奶等动物性产品以及果蔬等消费量总体呈现增加趋势,居民动优质蛋白及膳食纤维摄入不断增加。随着中国食物消费结构的改善,粮食安全定义也应及时做出调整,以保证相关研究的精确性。

5.2 对策

(1) 比较区域间优势,构建跨区域耕地保护补偿机制,如京津冀水源涵养地区作为经济发达及耕地压力重灾区,应向其他区域以横向财产转移支付等形式

换取相应耕地指标及实现区域间资源配置效率的最优化,缩小区域间发展差距。最后从预测的未来耕地压力持续走高的趋势来看,仍需政府扶持进行产业结构的引导调整,在进行生态退耕、休耕政策时应考虑当地粮食安全与耕地压力,合理进行布局。

(2) 长城沿线沙化退化地区应提高全域生态环境综合整治,阶段性改良沙化土地,培育沙产业种植基地,着力发展旱作节水型农业,推广节水型、抗逆性较强的农作物品种,采取田间有机无机肥配施,改善土壤结构,促进地力恢复及农业可持续发展。

(3) 黄土丘陵沟壑地区作为生态脆弱区,应将生态修复、水土流失治理、开展保护性耕作放在首位,有计划、探索性地逐步开展坡耕地整治项目。在年降水量超过 400 mm,坡度 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的坡耕地集中分布地区,开展雨养梯田,改善土壤侵蚀。拟选择陕北洛川塬,晋西太德塬,关中渭北台塬,陇东董志塬,对黄河塬面和沟头进行综合治理,改变塬面和沟头的土壤侵蚀。

(4) 京津冀水源涵养地区作为农牧耦合区应开展种养结合的措施,提升区域内饲料粮与口粮的品质与产量。加强地下水的超采综合治理,发展区域节水农业,同时需严格控制建设用地的扩张,加强该区域耕地及天然草地的保护,发展人工种草及草田轮作,形成农牧结合、草畜一体化的格局,生态闭环发展稳定的良田生态系统。

(5) 建立县级粮食储备库,构建粮食生产前后服务体系,利用智能化信息化手段构建智慧粮库,动态科学化管理粮食储备。确保北方农牧交错带内外粮食市场的流通性,实现带内各区域粮食供需平衡。以“藏粮于地、藏粮于技”为着力点,完善粮食生产保护支持体系,扩大新型农业主体粮食储备规模,减少粮食产后损失,实现“藏粮于民”,保障北方农牧交错带的可持续性发展。

参考文献 (References)

[1] 吴群.中国耕地保护的体制与政策研究[M].北京:科学出版社,2011.
Wu Qun. Research on the System and Policy of Cultivated Land Protection in China [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[2] 李玉平,蔡运龙.浙江省耕地变化与粮食安全的分析及预测[J].长江流域资源与环境,2007,16(4):466-470.
Li Yuping, Cai Yunlong. Analysis and prediction of cropland change and grain security in Zhejiang Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007,16(4):466-470.

[3] Allan W. Studies in African Land Usage in Northern Rhodesia, Rhodes Livingstone Papers and No.15 [M]. Cape Town: Oxford University Press, 1949.

[4] Allan W. The African husbandman [M]. New York: Barnes & Noble,1965.

[5] UNESCO & FAO. Carrying Capacity Assessment with a Pilot Study of Kenya: A Resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.

[6] 郑海霞,封志明.中国耕地总量动态平衡的数量和质量分析[J].资源科学,2003,25(5):33-39.
Zheng Haixia, Feng Zhiming. The quantity and quality analysis on dynamic equilibrium of the total cultivated land in China [J]. Resources Science, 2003, 25 (5): 33-39.

[7] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002,57(2):127-134.
Cai Yunlong, Fu Zeqiang, Dai Erfu. The minimum area per capita of cultivated land and its implication for the optimization of land resource allocation [J]. Acta Geographica Sinica, 2002,57(2):127-134.

[8] 刘运伟.典型山区耕地面积与粮食产量时空格局分析:以四川省凉山州为例[J].水土保持研究,2014,21(5):198-203.
Liu Yunwei. Spatiotemporal characteristics of cultivated land and grain output in the typical mountain areas: A case study of Liangshan prefecture, Sichuan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(5):198-203.

[9] 邓祥征,梁立,廖晓勇,等.国际粮食贸易影响下东北黑土地生产压力变化与保护策略[J].自然资源学报,2022,37(9):2209-2217.
Deng Xiangzheng, Liang Li, Liao Xiaoyong, et al. Research on changes in grain production pressure and protection strategies in the black soil region of Northeast China under the influence of international grain trade [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2209-2217.

[10] 罗翔,罗静,张路.耕地压力与中国城镇化:基于地理差异的实证研究[J].中国人口科学,2015(4):47-59.
Luo Xiang, Luo Jing, Zhang Lu. Farmland pressure and China's urbanisation: An empirical study with the view of geographical differences [J]. Chinese Journal of Population Science, 2015(4):47-59.

[11] 杨春来,夏斌.1999—2011年梅州市耕地压力与影响因素分析[J].广东农业科学,2013,40(21):233-236.
Yang Chunlai, Xia Bin. Analysis on cultivated land pressure and influence factors in Meizhou City from

- 1999 to 2011 [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013,40(21):233-236.
- [12] 杨青.云南省耕地压力测算及其时空差异和影响因素分析[D].云南昆明:云南财经大学,2017.
Yang Qing. Spatial differences and influences of cultivated land pressure in Yunnan Province [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University of Finance and Economics, 2016.
- [13] 杨人豪,杨庆媛,陈伊多,等.基于耕地—粮食—人口系统的休耕区域耕地压力时空演变及预测:以河北省为例[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):270-278.
Yang Renhao, Yang Qingyuan, Chen Yiduo, et al. Cultivated area-food-population system in land fallow area and analysis of spatio-temporal evolution and prediction of cultivated land index: A Case Study of Hebei Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018,36(3):270-278.
- [14] 付士波,朱前涛,杜荃深.黑河中游地区内陆河流域耕地压力动态分析与预测[J].南方农业,2014,8(12):121-124.
Fu Shibo, Zhu Qiantao, Du Jingshen. Dynamic analysis and prediction of cultivated land pressure in the middle reaches of Heihe River [J]. *South China Agriculture*, 2014,8(12):121-124.
- [15] 张慧,王洋.中国耕地压力的空间分异及社会经济因素影响:基于342个地级行政区的面板数据[J].地理研究,2017,36(4):731-742.
Zhang Hui, Wang Yang. Spatial differentiation of cropland pressure and its socio-economic factors in China based on panel data of 342 prefectural-level units [J]. *Geographical Research*, 2017,36(4):731-742.
- [16] 任桂镇,赵先贵,巢世军,等.基于耕地生态压力指数的中国耕地压力时空差异分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):37-41.
Ren Guizhen, Zhao Xiangui, Chao Shijun, et al. Temporal-spatial analysis of cultivated land pressure in China based on the ecological tension indexes of cultivated land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008,22(10):37-41.
- [17] 孙丽娜.1980—2015年间吉林省耕地利用变化对耕地压力的影响研究[J].资源与生态学报,2023,14(3):581-590.
Sun Lina. Impact of cultivated land-use change on the cultivated land pressure in Jilin Province of China from 1980 to 2015 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023,14(3):581-590.
- [18] 成六三,时伟宇.退耕对县域耕地压力效应的影响分析研究:以武隆县为例[J].中国农业资源与区划,2018,39(3):201-206.
Cheng Liusan, Shi Weiyu. Effects of land conversion projects on the land pressure: Taking Wulong County as a case [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018,39(3):201-206.
- [19] 农业部.农业部关于北方农牧交错带农业结构调整的指导意见[J].中华人民共和国农业部公报,2016(12):7-12.
Ministry of Agriculture. Guiding opinions of the Ministry of Agriculture on the adjustment of agricultural structure in the northern farming-pastoral ecotone [J]. *Gazette of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China*, 2016(12):7-12.
- [20] 汪芳甜.北方农牧交错带退耕还林生态效应评价:以乌兰察布市为例[D].北京:中国农业大学,2018.
Wang Fangtian. Evaluation of ecological effects for the grain for green project in the farming-pastoral ecotone of Northern China: A case study in the Ulanqab City [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [21] 朱红波,张安录.中国耕地压力指数时空规律分析[J].资源科学,2007,29(2):104-108.
Zhu Hongbo, Zhang Anlu. Analyzing temporal and spatial distribution characteristics of pressure index of cultivated land in China [J]. *Resources Science*, 2007,29(2):104-108.
- [22] 张利娅.中国粮食自给率研究[D].河南郑州:河南农业大学,2006.
Zhang Liya. Studies on food self-sufficient rate of China [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2006.
- [23] 崔宁波,王胜男.粮食安全背景下东北典型黑土区耕地压力动态变化及趋势分析[J].农业工程学报,2022,38(21):220-230.
Cui Ningbo, Wang Shengnan. Dynamic change and trend analysis of cultivated land pressure in typical black soil areas of Northeast China under food security [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(21):220-230.
- [24] 董婷婷,张增祥,钱风魁.中国北方农牧交错带耕地动态变化的遥感监测[J].农业工程学报,2007,23(6):78-82.
Dong Tingting, Zhang Zengxiang, Qian Fengkui. Dynamic change monitoring of cultivated land in a typical farming-pastoral ecotone in Northern China by remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007,23(6):78-82.
- [25] 淳阳,朱晚秋,潘洪义,等.重心转移视角下新型城镇化与生态足迹时空差异及其耦合关系研究:以四川省为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):306-317.
Chun Yang, Zhu Wanqiu, Pan Hongyi, et al. Spatio-

- temporal differences and coupling relationship between new urbanization and ecological footprint from the perspective of gravity transfer: A case study of Sichuan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(2): 306-317.
- [26] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 中国耕地低碳利用效率时空演变及其驱动因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 234-243.
- Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of low-carbon use efficiency of cultivated land in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8): 234-243.
- [27] 范中洲, 赵羿, 周宁, 等. 基于灰色 BP 神经网络组合模型的水上交通事故数预测[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 857-861.
- Fan Zhongzhou, Zhao Yi, Zhou Ning, et al. Integrated model for forecasting waterway traffic accidents based on the Gray-BP neural network [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 857-861.
- [28] 崔宁波, 王婷, 巴雪真, 等. 东北黑土区耕地生态承载力动态评价及预测分析[J]. 农业经济与管理, 2023(3): 37-47.
- Cui Ningbo, Wang Ting, Ba Xuezheng, et al. Dynamic evaluation and prediction analysis of cultivated land ecological carrying capacity in black soil region of Northeast China [J]. Agricultural Economics and Management, 2023(3): 37-47.
- [29] 李斌, 许仕荣, 柏光明, 等. 灰色—神经网络组合模型预测城市用水量[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2): 66-68.
- Li Bin, Xu Shirong, Bai Guangming, et al. Prediction of urban water consumption by gray-neural network model [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(2): 66-68.
- [30] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 174-182.
- Liu Mengzhu, Wang Yanfang, Pei Hongwei. The changes of land use and carbon storage in the northern farming-pastoral ecotone under the background of returning farmland to forest (grass) [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 174-182.
- [31] 孔德明, 郝丽莎, 夏四友, 等. 粮食单产视角下中国北方农牧交错带粮食安全研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 782-792.
- Kong Deming, Hao Lisha, Xia Siyou, et al. Food security in the argo-pastoral ecotone of Northern China from the perspective of grain yield [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 782-792.
- [32] 王玫, 王立源. 京津冀水源生态涵养区建设面临的困境及应对措施[J]. 环境保护, 2015, 43(16): 40-43.
- Wang Mei, Wang Liyuan. Difficulties and measures in the construction of water ecological conservation areas in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Environmental Protection, 2015, 43(16): 40-43.
- [33] 张新生, 赵梦旭, 王小完. 尾段残差修正 GM(1, 1) 模型在管道腐蚀预测中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(1): 65-70.
- Zhang Xinsheng, Zhao Mengxu, Wang Xiaowan. Application of modified empenage residual error GM(1, 1) model in prediction of pipeline corrosion [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(1): 65-70.
- [34] 程晓瑜, 盖微微, 杨振民. 陕西省耕地压力时空演变及驱动因素研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 165-173.
- Cheng Xiaoyu, Gai Weiwei, Yang Zhenmin. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land pressure in Shaanxi Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 165-173.