王雨枫,江清阳,王 玮,等.基于生态足迹的耕地生态安全时空测度及影响要素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4524-4530.
Wang Y Y, Jiang Q Y, Wang W, et al. Spatio-temporal measurement of arable land ecological security and its influencing factors based on ecological footprint [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4524-4530.

基于生态足迹的耕地生态安全时空测度及影响要素

王雨枫[1,2,3,4,5],江清阳[1*],王 玮[1],陈立民[1],何佩云[1] (1.西南交通大学,设计艺术学院/智慧城乡环境可持续研究所,四川 成都 611756；2.省部共建煤基能源清洁高效利用国家重点实验室,山西 太原 030024；3.四川大学,教育部磷资源综合利用与清洁加工工程研究中心,四川 成都 610065；4.服务科学与创新四川省重点实验室,四川 成都 610031；5.教育部寒地黑土生境健康国际合作联合实验室,黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要：以 1990~2023 年东北地区 Landsat 和社会经济数据为基础,综合运用生态足迹、生态承载力等指数及地理加权模型,分析耕地生态安全时空特征并探讨其影响机制.结果表明:人均耕地生态足迹从 0.135hm^2/人提升至 0.145hm^2/人,人均耕地生态承载力从 0.115hm^2/人降至 0.095hm^2/人,人均耕地生态赤字从 0.16hm^2/人增加到 0.058hm^2/人;农田产量指标呈现出减少态势,耕地生态系统压力指标则呈现增长趋势,整体生态安全性则趋于提升;自然资源条件的影响呈现出递减态势,而地理区位条件、社会经济指标以及区域政策等要素则显示出增强的趋势.本研究对于耕地资源的合理利用及生态安全可持续发展具有参考价值.

关键词：耕地生态安全；生态足迹；生态承载力；影响要素；东北地区
中图分类号：X171,X196 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4524-07

Spatio-temporal measurement of arable land ecological security and its influencing factors based on ecological footprint.

WANG Yu-Yeng[1,2,3,4,5], JIANG Qing-Yang[1*], WANG Wei[1], CHEN Li-Min[1], HE Pei-Yun[1] (1.School of Design/Smart urban and Rural Environmental Sustainability Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China；2.State Key Laboratory of Clean and Efficient Coal Utilization, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China；3.Engineering Research Center of Comprehensive Utilization and Clean Processing of Phosphorus Resources, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China；4.Service Science and Innovation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China；5.International Cooperation Joint Laboratory of Health in Cold Region Black Soil Habitat of the Ministry of Education, Harbin 150006, China).
China Environmental Science, 2025,45(8)：4524~4530

Abstract：Based on Landsat and socio-economic data in the Northeast region from 1990 to 2023, this paper analyses the spatio-temporal characteristics of arable land ecological security using ecological footprint and ecological carrying capacity indexes, and explores the influence mechanism using geographic weighting model. The result show that: The per capita arable land ecological footprint increased from 0.135hm^2 per person to 0.145hm^2 per person, the per capita arable land ecological capacity decreased from 0.115hm^2 per person to 0.095hm^2 per person, and the per capita arable land ecological deficit increased from 0.16hm^2 per person to 0.058hm^2 per person. Farmland yield indicators show a decreasing trend, while indicators of ecosystem pressure on arable land show an increasing trend, and overall ecological security tends to improve. The impacts of natural resource on arable land ecological security shows a decreasing trend, while geographical location, socio-economic and regional policies show an increasing trend. This study is of reference value for the rational use of arable land resources and the sustainable development of ecological security.

Key words：arable land ecological security；ecological footprint；ecological carrying capacity；influencing factors；northeast region

耕地作为国土空间的关键战略资源,经过长期开发已成为融合社会-经济-生态的复合系统[1].在工业化进程推动下,耕地利用强度加剧,生态系统退化明显,耕地生态安全面临严峻挑战[2-3].当前耕地资源管理面临监测滞后、空间特征表达不足等困境.基于生态足迹理论的研究可动态反映耕地生态压力及承载状态,为识别风险区域、制定差异化管理策

收稿日期：2025-02-27
基金项目：四川省科技计划项目(2024NSFSC0789,2024NSFSC1233);省部共建煤基能源清洁高效利用国家重点实验室开放基金项目资助(MINYSKL202409);教育部磷资源综合利用与清洁加工工程研究中心开放课题基金资助(2024CUCPPR04);服务科学与创新四川省重点实验室资助(KL2407);教育部寒地黑土生境健康国际合作联合实验室开放课题资助(HCRBSH202311-09)
* 责任作者, 15952023508@163.com

略提供理论支持,助力社会可持续发展和生态文明建设.

耕地生态安全问题与国家粮食安全、生态环境保护密切相关,是实现区域可持续发展的关键支撑.国外普遍运用遥感解译、系统动力学、地理信息系统等技术手段,结合土地利用变化模型和生态阈值理论,对耕地生态风险进行预测与预警[4-5].国内关于耕地生态安全的研究起步稍晚,主要聚焦于耕地质量演变、土地退化监测及生态安全评价体系构建等,以评估耕地资源的动态变化趋势[6-7].在理论层面,研究不断从传统的资源管理理念向生态系统安全与可持续发展理论演化,强调人地系统相互作用对耕地安全的深层影响[8],Yu 等[9]从农业可持续发展视角,提出了一种既考虑耕地景观又考虑与周围景观相互作用的城郊耕地景观生态安全评价方法.在方法层面,学者引入了能值分析、生态足迹模型、综合指标评价、层次分析法、耦合协调模型等多种工具,增强了研究的定量化和系统性[10-11].在研究视角层面,研究涵盖生态安全、粮食安全、资源约束、耕地保护等多个维度,部分研究尝试将生态安全与社会经济因素结合,提升研究的综合性和应用性[12-13],Zong 等[14]从土地利用冲突视角,对中国海岸带的土地利用类型及其冲突做了详细测度,并提出了土地利用管理的建议.此外,针对典型区域开展的实证分析逐渐增多,从农业核心区扩展到城市边缘区、生态脆弱区及高原丘陵区等,提升了研究的区域为性与政策适应性.基于前述研究成果,下一步有必要综合考虑耕地数量安全与生态安全,并对区域耕地资源综合利用的可持续过程进行评价.

已有耕地生态安全的研究主要集中于东部地区及干旱地带,对关系到国家安全战略的粮食主产区的耕地资源合理利用及生态安全关注较少.本研究立足耕地生态安全可持续发展,采用生态足迹、生态承载力等指数及地理加权模型等复合指标测度东北地区耕地生态安全水平,有望对中国耕地生态安全及农业可持续发展提供理论与现实经验.

1　数据与方法

1.1　研究区概况

东北地区涵盖黑龙江省、吉林省与辽宁省,外围被大兴安岭(西部)、小兴安岭(北部)和长白山脉(东部)环绕,中部为东北平原,其地理坐标横跨东经118°~135°,北纬 38°~53°之间,为中国重要的商品粮基地,自然资源丰富,土地肥沃,水热条件适中.建国初期,三省耕地面积约 0.173 亿 hm^2,占全国比重约16%,粮食总产量达 300 亿斤左右,占全国总产量的约 13%,是国家粮食安全的重要保障.至 2023 年,受农业机械化提升与土地整治推动,三省耕地面积增至 0.183 亿 hm^2,但耕地面临过度耕作、黑土流失、耕地退化、生态风险上升等严峻挑战.作为国家粮食核心区,研究其耕地生态安全及影响要素,具有典型为性.

1.2　数据来源

本次研究采用的数据涵盖了社会经济与地理空间等领域.其中的社会经济数据,包括东北地区的谷物、玉米、棉花、油料、蔬菜等的产量、播种面积与总人口数量,均源自于辽宁、吉林及黑龙江的《统计年鉴》(1990~2023).全国主要农作物的平均统计数据源自《中国统计年鉴》与《中国农村统计年鉴》(1990~2023),而某些缺失数据则直接获取自各级政府官方网站.耕地的地理空间分布数据主要来源于 1990 年、2000 年、2010 年及 2023 年夏季的 Landsat TM/ETM 遥感影像.这些数据在 GEE (Google Earth Engine)地理云平台上经过一系列处理,包括校正影像的波段、大地坐标系以及地面控制点等空间信息.针对校正后的影像,依据其光谱反射特性、背景环境以及地形特征,通过人机协同解析与专家经验,识别并判定土地使用类别.鉴于研究目的,需将水田、旱地、坡地统摄于此次耕地的研究框架内.数据的整体准确度在 87.58%~94.06%之间,满足科学研究的标准.

1.3　研究方法

1.3.1　生态足迹　生态足迹能量化在既定经济规模下,为支撑特定人口的生活水平所需的资源消耗与产生的废弃物所对应的生态生产用地面积,各类生态生产性土地在地理分布上具有独特性,其总量聚合构成了总的生态足迹.其表达式为:

$$\mathrm{ef}=\frac{\mathrm{EF}}{N}=\sum_{j=1}^{6}\left(\sum_{i}^{n}A_i\cdot\gamma_j\right)=\sum_{j=1}^{6}\left(\sum_{i}^{n}\frac{C_i}{P_i}\cdot\gamma_j\right)\qquad(1)$$

式中:ef 为区域人均生态足迹;EF 为区域总生态足迹;N 为区域的人口总量;A_i 为折算的生物生产性土地面积;γ_j 为均衡因子;c_i 为第 i 种消费品的人均消费

量;P_i 为第 i 种消费品的平均生产能力;j 为生物生产性土地类型;i 为消费品和投入的类型.

1.3.2 生态承载力 生态承载力能量化一定区域内可供生物生产的土地资源总量,具体体现为可用于生物生长的土地总面积.其表达式为:

$$ec = \frac{EC}{N}\sum_{j=1}^{6}\alpha_j \cdot \gamma_j \cdot y_j \quad (2)$$

式中:ec 为区域人均生态承载力;EC 为区域生态承载力总值;a_j 为第 j 土地类型的实际面积;y_j 为产量因子.

1.3.3 生态赤字/盈余 生态足迹与生态承载力之间的关系揭示了生态系统的收支状况.当一区域的平均生态足迹超出其平均生态承载力时,揭示了存在生态赤字的现象.相反,若平均生态足迹低于平均生态承载力,则体现为生态盈余.其表达式为:

$$ed(er) = df-ec \quad (3)$$

式中:ed 为生态赤字;er 为生态盈余;ef 为人均生态足迹;ec 为人均生态承载力.

1.3.4 耕地生态压力指数 耕地生态压力指标量化了某一区域人均可再生资源所对应的耕地生态足迹与耕地生态容量之间的比率,揭示了耕地生态系统承受的压力程度.其表达式为:

$$EI = \frac{ef^*}{ec} \quad (4)$$

式中:EI 为耕地生态压力指数;ef^* 为可更新资源的人均耕地生态足迹;ec 为人均耕地生态承载力.依据国内外先前的研究成果及其对耕地生态压力的评估与分级方法,并考虑到东北地区的具体条件,制定了该区域的生态安全等级指标体系(表 1).

表 1 等级划分标准

Table 1 Classification standards of grades

生态安全等级	生态压力类型	生态压力状况	生态压力指数	生态安全状态
1	耕地生态低压	低	<0.60	安全
2	区	稍低	0.61~0.80	很安全
3	耕地生态中压	平衡偏低	0.81~1.00	较安全
4	区	平衡偏高	1.01~1.20	稍不安全
5	耕地生态高压	高	1.21~1.40	较不安全
6	区	超高	>1.41	很不安全

1.3.5 耕地生态安全影响因素(GWR 模型) 在当今全球化背景下,耕地生态安全的演化受到多种因素的交互影响,以自然环境、地理区位、社会经济及区域政策等多层级要素为主(表 2)[15].地理加权回归模型(GWR 模型)能够有效测度指标参数在地理空间中的变化情况,准确反映出耕地生态安全的空间特征.其表达式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i,\upsilon_j) + \sum_{k=1}^{i}\beta_k(\mu_i,\upsilon_j)X_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中:$\beta_0(\mu_i,\upsilon_j)$为常数项; $\beta_k(\mu_i,\upsilon_j)$为回归系数;$t$ 为研究单元个数;X_{ik} 为研究区各评价单元的变量数;ε_i 为随机误差.

表 2 影响因素指标

Table 2 Influencing factor indicators

目标层	要素层	计算方法	单位
自然资源条件	年降水量	统计年鉴数据	mm
	年平均气温	统计年鉴数据	°
	地形坡度	GIS 采集 DEM 数据	m
地理区位条件	距城镇	GIS 采集城镇数据	km
	距铁路	GIS 采集公路数据	km
	距河流	GIS 采集城镇数据	km
社会经济因素	农业技术人员	统计年鉴数据	人
	农民人均纯收入	统计年鉴数据	元
	粮食单产	粮食总产量/耕地面积	kg/hm²
区域政策因素	地方公共财政支出	统计年鉴数据	万元
	农业税	统计年鉴数据	万元
	农业贷款率	统计年鉴数据	%

2 结果与分析

2.1 耕地生态足迹分析

基于 1990~2023 年东北地区的耕地及其相关数据,通过式(1)~(3),计算出人均耕地生态足迹、人均生态承载力以及人均生态赤字/盈余等指标(图 1).

人均耕地生态足迹方面,1990~2023 年,呈现出“减少~稳定增长~减少”的波动式增长态势.其中 1990~1995 年呈现出减少的趋势,数值从 0.135hm^2/人下降至 0.115hm^2/人.主要归因于东北地区先行推进的城镇化与工业化的进程,促使大量农田转化为城市用地,导致耕地面积不断缩减,对农产品的产出量产生了一定程度的制约.1995~2015 年,呈现出持续增长的趋势,从 0.115hm^2/人提升至 0.145hm^2/人,期间的平均年增长率约为 3.93%.主要归因于东北地区的农业机械化水平持续提升、土地整治项目与农业科技投入的增加,共同推动了耕地的集约化利用程度上升,导致农产品总产量保持稳定增长态势.东北地区的人类社会经济活动对该区域内的耕地

资源产生了更强的依赖性.2015~2023 年,呈现出微弱的减少趋势,主要源于近年来东北地区人口外流加剧,且农业行业的附加值低于第三产业,农业从业人员减少,导致农产品产量增速放缓.

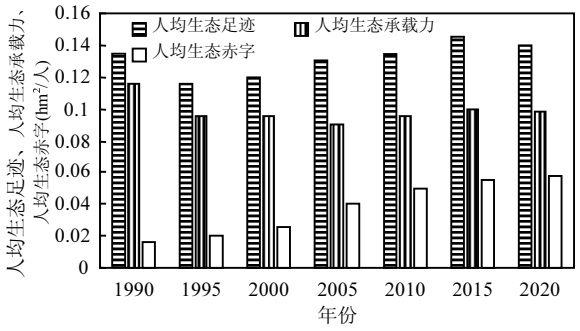


图 1　生态足迹变化趋势

Fig.1　shows the changing trend of ecological footprint

人均耕地生态承载力方面,1990~2023 年,东北地区虽然呈下降趋势,但是基本保持稳定仅在小范围内波动.其中 1990~1995 年,呈下降趋势,从 0.115hm^2/人减少到 0.095hm^2/人,下降达 0.02hm^2/人.主要源于东北地区城镇发展过程中占用了大量耕地,导致耕地面积锐减,多方因素共同促使耕地总面积持续减少.1995~2015 年,基本保持稳定,仅在小范围内波动,期间小幅度上升,表明东北地区人均耕地生态承载力具有较大的恢复能力,随着近年来政府部门对耕地保护的宣传效应,人们的耕地保护意识不断增强,耕地占补平衡等政策措施使耕地资源得到了不同程度的补充.

人均耕地生态赤字方面,1990~2023 年,保持稳定上升趋势,由 0.016hm^2/人增长到 0.058hm^2/人.主要源于社会经济不断发展,东北地区对耕地资源的需求量已经超过了其自身资源的承载力,耕地利用不安全状态逐步显现.

基于上述分析,1990~2023 年,东北地区的单位人口耕地生态足迹呈现出持续增长态势,与此相对,人均耕地生态承载能力维持平稳状态,导致了人均耕地生态赤字的逐步攀升,基于此,主导东北地区耕地生态赤字形成的关键因素是人均耕地生态足迹的增加.

2.2　耕地生态安全要素分析

使用式(4)测算东北地区 1990~2023 年间的耕地生态压力指数,通过对耕地生态压力指数时空变化的分析,判断东北地区耕地生态安全水平(图 2).

耕地产量因子方面,1990~2023 年,整体表现为下滑态势,尽管其变动幅度相对微小.其中 1990~2000 年,大幅度降低,主要源于东北地区率先进入城镇化工业化,城镇化导致耕地大面积减少.1990 年以来,黑龙江、吉林省部分地区开始工业化建设,尤其是资源型城市建设,2000 年开始东北地区响应国家生态保护的方针,逐步实施退耕还林政策,使得东北地区耕地资源数量减少,而相应的耕地资源变化导致东北地区耕地产量因子产生了较大变化.2000~2023 年,呈现波动,主要源于人口增长、粮食增产及耕地面积变化等多方因素综合作用的结果.

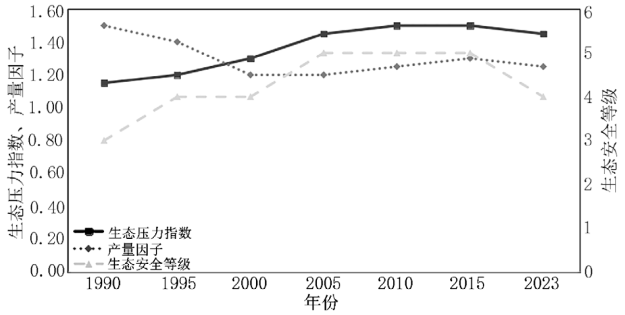


图 2　生态安全变化趋势

Fig.2　shows the trend of ecological security change

耕地生态压力方面,1990~2023 年,总体呈上升趋势,但是近年来呈现缓和趋势,由 1.15 增长到 1.45,年平均增长率为 3.57%.表明东北地区耕地生态压力不断增大,但是在生态保育等相关措施下,已经呈现好转.

耕地生态安全方面,1990~2023 年,安全等级呈上升趋势,由较为安全的 3 级上升至较不安全的 5 级,最后在多方措施下呈现好转趋势,降低为稍不安全的 4 级.表明东北地区耕地生态安全水平虽然不断恶化,但是近年来趋势减缓.1990~2015 年间,东北地区耕地生态压力指数持续上升并保持稳定,耕地生态压力状况由中压到高压,主要源于东北地区人口增长减缓,并伴随着人口外流现象,但是其总人口仍然保持稳定增长,年均增长率为 0.63%.人口增长引起了对耕地农产品需求的增长,导致耕地生态足迹持续增长,耕地的生态压力增加.但是近年来,在国家加强生态环境保护的政策下,耕地生态环境呈现好转,生态压力减缓.

2.3　耕地生态安全时空变化分析

为了进一步了解 1990~2023 年间东北地区 36 个地级市的耕地生态安全空间分布演变情况,选择 1990、2000、2010 及 2023 年作为阶段性节点,对东北地区 36 个地级市耕地生态安全压力指数进行测算并按照分类标准统计其不同安全等级(表 3),并利用 GIS 功能绘制地级市耕地生态安全分布图(图 3).

表 3 等级统计(个)

Table 3 Grade Statistics Table

年份	安全	很安全	较安全	稍不安全	较不安全	很不安全
1990	0	1	14	6	6	9
2000	0	0	0	2	22	12
2010	0	0	0	11	12	13
2023	0	0	3	15	18	0

1990 年,耕地生态安全水平较高的地区主要位于辽宁,吉林省次之,黑龙江最低.其中以环渤海为中心的大连、营口及盘锦等城市,形成了生态安全水平较高的核心区域,其较安全地区占东北地区面积的 41.70%.东北地区北部的黑龙江哈尔滨、齐齐哈尔及双鸭山等大部分城市的耕地生态安全水平都较低,其很不安全占东北地区面积的 25.00%.2000 年,东北地区耕地生态安全整体水平下降,其中生态安全水平较高的地区数量下降,而生态安全水平较低的地区数量上升.其中以哈尔滨、鸡西等城市形成了生态安全水平较高的核心区域,其稍不安全地区占东北地区面积的 5.56%.东北地区中部吉林省的白城、松原及白山等大部分城市的耕地生态安全水平都较低,其很不安全地区占东北地区面积的 33.33%.2010 年,东北地区耕地生态安全整体水平基本稳定,其中生态安全水平较高的地区数量上升,而生态安全水平较低的地区数量基本稳定.其中以长春、哈尔滨及吉林等城市,形成了生态安全水平较高的核心区域,其稍不安全地区占东北地区面积的 30.56%.环渤海地区的大连、锦州及葫芦岛等大部分城市的耕地生态安全水平都较低,其很不安全地区占东北地区面积的 36.11%.2023 年,东北地区耕地生态安全整体水平缓慢上升,其

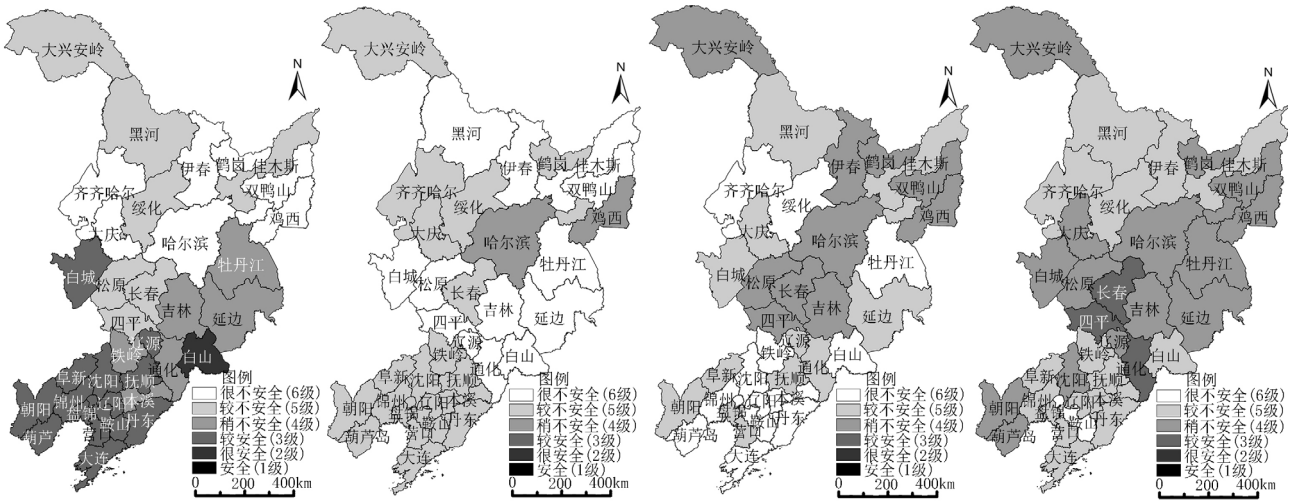


图 3 空间分布

Fig.3 Spatial Distribution map

中生态安全水平较高的地区数量上升,而生态安全水平较低的地区数量减少.其中以长春、四平及通化等城市,形成了生态安全水平较高的核心区域,其较安全地区占东北地区面积的 8.33%.环渤海地区的大连、锦州及葫芦岛等大部分城市的耕地生态安全水平都较低,其较不安全地区占东北地区面积的 47.22%.

30 年间,位于东北地区南部的辽宁省耕地生态安全水平较高,但是其生态安全呈下降趋势.由于辽宁省位于环渤海区域,其耕地利用状况受本地经济发展水平与产业政策的影响显著,退耕还林政策与农业产业布局的优化也对其耕地面积产生了明显影响,导致耕地面积呈现出显著的变化趋势.鉴于生态足迹的逐年攀升与生态承载力的递减态势,辽宁省人民政府亟需实施耕地保护策略以保护耕地资源,有效减轻不断加剧的耕地生态系统压力.吉林省

的耕地生态系统安全性居中,其状况大致维持稳定,但是近年来,随着科技不断进步,对坡地的改造能力提高,吉林省的耕地面积不断扩大,粮食产量也稳步上升,对耕地生态造成了一定的压力.黑龙江的耕地生态安全水平较低但是呈好转趋势[16].黑龙江的平原面积广阔,可耕种面积较大,由于地理条件优越耕地资源丰富,工业化水平较高,促使农业生产中各要素投入较高.鉴于庞大的人口基数,导致耕地生态足迹显著,进而增加了耕地生态压力,并降低了生态安全水平.黑龙江应逐步完善土地利用的相关政策,实施退耕还林政策,促使耕地生态安全水平稳定提高.

3　影响机制分析

耕地生态安全受多种因素综合影响,包括自然环境、地理位置、经济社会状况和相关政策.本研究从 4 个层次选取 12 个指标深入分析其影响.地理加权回归(GWR)模型具有较强空间解释力,能准确反映生态安全值变化的空间模式与地域特性.经标准化处理后,利用 SPSS 对变量进行共线性检验,12 个指标因子的方差膨胀因子(VIF)均低于 7.6,适合作为 GWR 模型的解释变量.从表 4 解析结果来看,1990~2023 年东北地区耕地生态安全受各类因素影响呈现异质性演变轨迹.其中,自然资源类指标呈显著递减态势,而地理区位、社会经济以及区域政策相关的指标则呈增长趋势.

表 4　因素探测结果

Table 4　Results of factor detection

目标层	要素层	1990 年	2023 年
自然资源条件	年降水量	0.03~0.44(0.32)	0.03~0.52(0.25)↓
	年平均气温	0.02~052(0.21)	0.02~0.55(0.13)↓
	地形坡度	−0.01~ −0.65(0.42)	−0.03~ −0.54(0.32)↓
地理区位条件	距城镇	−0.01~0.95(0.31)	−0.03~0.85(0.42)↑
	距铁路	0.21~0.91(0.30)	0.23~0.84(0.35)↑
	距河流	0.23~1.21(0.42)	0.03~0.62(0.31)↓
社会经济因素	农业技术人员	0.02~0.83(0.42)	0.03~0.97(0.34)↓
	农民人均纯收入	0.22~0.93(0.33)	0.32~0.96(0.53)↑
	粮食单产	0.03~0.73(0.31)	0.03~0.74(0.42)↑
区域政策因素	地方公共财政支出	0.15~0.95(0.40)	0.22~0.82(0.43)↑
	农业税	−0.21~ −0.92(0.51)	−0.02~−0.72(0.41)↓
	农业贷款率	0.22~0.93(0.42)	0.11~0.93(0.51)↑
	带宽	50.23	62.37
	AICc	151.24	164.45
	R^2	0.81	0.90
	调整后 R^2	0.75	0.87

注:()内数值为GW模型中变量回归系数的平均值.

3.1　自然资源条　自然资源条件是决定东北地区耕地生态禀赋的基础,其中年降水量、年平均气温等气候因子直接影响作物生长环境与产出效率,而地形坡度则关系到耕地的开发难度与资源可达性.1990 年代,东北地区尚处于经济发展初期,农业生产主要依赖自然条件,自然因素对耕地生态安全的影响较为显著.但随着农业技术进步、基础设施完善和区域政策加强,耕地生态安全对自然资源的依赖程度相对下降.目前,黑龙江凭借优越的地形地貌和土壤条件,耕地生产能力突出:吉林农业基础良好,次于黑龙江:而辽宁因地形复杂、后备耕地不足,生态安全基础薄弱,近年来有所改善.

3.2　地理区位条件　地理区位条件在影响耕地生态安全方面的作用逐步增强.随着农业现代化推进,交通通达性、城乡接近度成为影响农业生态系统的重要因素.尤其是距铁路和城镇的便利性,其影响力不断上升,而传统意义上与水源距离的相关性因灌溉技术普及而有所减弱.目前,黑龙江平原交通体系完善,有利于农业投入与产品运输,生态安全水平较高.吉林近年来加快交通网络建设,耕地生态状况稳步改善.辽宁丘陵广布,农业人口外流显著,但在政府推动下,灌溉与交通体系逐步完善,生态安全逐渐提升.

3.3　社会经济因素　社会经济因素随着地区发展水平提升,对耕地利用方式和生态安全状况产生深远影响.农民人均纯收入与粮食单产持续增长,提升了耕地利用效率.然而,新技术、新方法的普及导致农业技术人员的重要性下降,对耕地生态的重要性减弱.辽宁省工业化程度高、城镇化速度快,耕地生态安全相对较低,而黑龙江、吉林农业比重大,资源条件较好,耕地生态安全保持良好态势.

3.4　区域政策因素　区域政策因素在保障耕地生态安全中起关键作用.耕地保护、荒地复垦、农业补贴等政策不断完善,地方公共财政支出和农业贷款率对生态安全的促进作用日益增强,而农业税影响力则有所减弱.目前黑龙江、吉林出台较为系统的耕地保护政策,取得良好成效,而辽宁在工业化发展中对农业政策关注相对滞后,相关政策效果仍有待进一步发挥.

鉴于东北地区作为中国的粮食生产核心区域,为了确保国家的粮食安全与生态平衡战略得以有效实施,应平衡耕地保护地区的权益配置,注重城市

发展的各要素与耕地保护的协调,提升耕地生态系统服务水平.

4 结论

4.1 单位人口耕地生态足迹呈现出波动增长的趋势,从 0.135hm^2/人提升至 0.145hm^2/人,形成了“减少-稳定增长-减少”的 3 个阶段.人均耕地生态承载能力呈现出整体下滑态势,从 0.115hm^2/人降至 0.095hm^2/人,耕地生态承载能力显示出逐步稳定的发展迹象.人均耕地生态赤字呈现出持续上升的趋势,从 0.16hm^2/人提升至 0.058hm^2/人,主要驱动因素是人均耕地生态足迹的变动.

4.2 东北地区的耕地产量因素表现出总体下降趋势,但变化幅度相对温和.耕地生态压力指数呈现出总体递增态势,从 1.15 提升至 1.65.生态安全状况整体趋向改善,从较为安全的第 3 级提升至略显不安全的第 4 级.辽宁省耕地生态安全水平较高,但是其生态安全呈下降趋势.吉林省耕地生态安全水平基本保持稳定状态,黑龙江的耕地生态安全水平较低但呈明显的上升趋势.

4.3 东北地区耕地生态安全时空演变主要受到自然、区位、经济及政策等多因素综合作用,其中自然资源条件的影响力呈现下降趋势,而地理区位条件、社会经济因素及区域政策等因素呈上升趋势.

参考文献:

[1] 吕文宝,徐占军,杨丽琪,等.基于多源遥感数据的耕地生态系统稳定性评价-以汾河流域为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2937-2947.
Lu Wenbao, Xu Zhanjun, Yang Liqi, et al. Evaluation of cultivated land ecosystem stability based on multi-source remote sensing data: A case study of the Fen River Basin [J]. China Environmental Science. 2024, 44(5):2937-2947.

[2] Xu H, Fan Z, Ahmad F, et al. Exploring the ecological protection impacts of cultivated land transfer: Explanation based on fertilizers and pesticides [J]. Ecological Indicators, 2023,154:110681.

[3] Fang A, Shi Y, Chen W, et al. Trade-off and synergy relationships and regional regulation of multifunctional cultivated land in the Yellow River Basin [J]. Frontiers in Environmental Science, 2025,13.

[4] He Y, Wu D, Liu Y, et al. Review of research on evaluating the ecological security of cultivated land [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023,11.

[5] Lee C, Qian A. Regional differences, dynamic evolution, and obstacle factors of cultivated land ecological security in China [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2024,94:101970.

[6] 张 婕,刘玉洁,张二梅,等.中国县域耕地动态演变及其驱动机制 [J]. 地理学报, 2023,78(9):2105-2127.
Zhang Jie, Liu Yujie, Zhang Ermei, et al. Dynamic evolution of cultivated land in county areas of China and its driving mechanism [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(9):2105-2127.

[7] 张云霞,郭朝晖,肖顺勇,等.基于神经网络和 GIS 的耕地土壤铊含量分布及其驱动因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):269-277.
Zhang Yunxia, Guo Zhaohui, Xiao Shunyong, et al. Distribution of thallium content in cultivated soil and its driving factors based on neural network and GIS [J]. China Environmental Science, 2024,44 (1):269-277.

[8] Ma T, Li J, Bai S, et al. Optimization and construction of ecological security patterns based on natural and cultivated land disturbance [J]. Sustainability, 2022,14(24):16501.

[9] Yu D, Wang D, Li W, et al. Decreased landscape ecological security of peri-urban cultivated land following rapid urbanization: An impediment to sustainable agriculture [J]. Sustainability, 2022,10(2): 394.

[10] Wang Y. Spatial–temporal evolution of “Production-Living-Ecologica” function and layout optimization Strategy in China: a case study of Liaoning Province, China [J]. Environmental Science and Pollution research International, 2023,30(4):10683-10696.

[11] Xie H, He Y, Choi Y, et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS [J]. Sci. Total Environ., 2020,704:135427.

[12] 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. Evolution, vision, goals and realization paths of China's farmland protection and utilization policies [J]. Journal of Management World, 2022,38(11):121-131.

[13] 王雨枫,曹洪军.东北地区城镇一体化时空分异及影响机制 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(3):145-150.
Wang Yufeng, Cao Hongjun. Spatio-temporal differentiation and influence mechanism of urban integration in Northeast China [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(3):145-150.

[14] Zong S, Hu Y, Zhang Y, et al. Identification of land use conflicts in China's coastal zones: From the perspective of ecological security [J]. Ocean & Coastal Management, 2021,213:105841.

[15] 王雨枫,曹洪军.中国城市群城镇综合发展测度及影响因素 [J]. 中国软科学, 2022,(4):87-94.
Wang Yufeng, Cao Hongjun. Measurement and influencing factors of comprehensive urban development in China's urban agglomerations [J]. China Soft Science, 2022,(4):87-94.

[16] Wang Y. Analysis on the evolution of spatial relationship between population and economy in the Beijing-Tianjin-Hebei and Shandong region of China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022,83:103948.

作者简介: 王雨枫(1989-),男,四川绵阳人,助理教授,博士后,主要从事城市生态模拟,资源配置管理研究.lyfq2018@foxmail.com.