doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.058

基于测度-分异-机制-管控框架的粮食主产区耕地生态系统退化风险研究

郭欣欣　孙甲荣　孙　哲　蔡亚君　马彤彤　杜国明
（东北农业大学公共管理与法学院，哈尔滨 150030）

摘要：综合把握粮食主产区耕地生态系统退化风险水平、分布特征及其驱动机制可为区域耕地生态系统退化风险的防控治理提供有益参考。以黑龙江省为例，本文基于测度-分异-机制-管控框架，引入耕地生态系统服务负向价值与净价值构建耕地生态系统退化风险指数，运用空间自相关和地理探测器等方法综合分析黑龙江省 2020 年耕地生态系统退化风险的空间分异特征及其影响机理，并提出管控建议。结果表明，2020 年黑龙江省耕地生态系统中等退化风险及以上区域占总县域数量的 62.03%，区域耕地生态系统退化风险指数平均值为 22.25%，为中等退化水平；耕地生态系统退化风险在空间上表现出明显的异质性及聚集性，中等及以上退化风险区主要分布在研究区西部和西南部，低退化风险区及较低退化风险区主要分布在研究区南北轴带（除中部地区）及东部区域，并呈现以低-低和高-高集聚为主的聚集特征；人口密度、路网密度、城镇化率、人均 GDP、农业机械投入强度和灌溉指数等社会经济因素是黑龙江省耕地生态系统退化的主控因素；耕地投入强度与人口经济指标间相互作用、耕地投入强度关键指标间相互作用及人口经济指标间相互作用会显著影响退化风险水平；应通过分区管控降低源头压力、进行全程监控、实施退化治理等措施进行耕地质量全生命周期管控。研究成果可为黑龙江省及其他粮食主产区测度及遏制耕地生态系统退化风险提供理论和实践参考。

关键词：耕地生态系统；退化风险；生态系统服务价值；粮食主产区；黑龙江省
中图分类号：F301.21；X826　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)10-0635-13　　**OSID**：

Degradation Risk of Cultivated Land Ecosystems in Major Grain Producing Areas Based on Measurement – Differentiation – Mechanism – Control Framework

GUO Xinxin　SUN Jiarong　SUN Zhe　CAI Yajun　MA Tongtong　DU Guoming
(*College of Public Administration and Law*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Comprehensively understanding the level, distribution characteristics, and driving mechanisms of cultivated land ecosystem degradation risks in major grain producing areas can provide valuable references for the prevention and control of regional cultivated land ecosystem degradation risks. Taking Heilongjiang Province as an example, based on the measurement – differentiation – mechanism – control framework, the negative value and net value of cultivated land ecosystem services were introduced to construct a cultivated land ecosystem degradation risk index. Using spatial autocorrelation and geographical detector methods, the spatial differentiation characteristics and influencing mechanisms of cultivated land ecosystem degradation risks in Heilongjiang Province in 2020 were analyzed, and control suggestions were provided. The results showed that in 2020, the areas with moderate and higher degradation risk in the cultivated land ecosystem of Heilongjiang Province accounted for 62.03% of the total number of counties. The average value of the degradation risk index of the regional cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province was 22.25%, which was at a moderate degradation level. The degradation risk of the cultivated land ecosystem showed obvious heterogeneity and aggregation in space. The areas with moderate and higher degradation risk were mainly distributed in the western and

收稿日期：2025-02-14　修回日期：2025-05-23
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFD1500901）、黑龙江省自然科学基金项目（ZL2024D002）、东北农业大学学术骨干项目（20XG22）和国家留学基金委访问学者项目（202306610035）
作者简介：郭欣欣（1982—），女，副教授，博士，主要从事自然资源利用与管理研究，E-mail：xinxin8504021@163.com
通信作者：杜国明（1979—），男，教授，博士生导师，主要从事土地资源优化配置与农村区域发展研究，E-mail：duguoming@neau.edu.cn

southwestern part of the study area, while the areas with low degradation risk and relatively low degradation risk were mainly distributed in the north-south axial zone (excluding the central region) and the eastern region of the study area, and presented the aggregation characteristics mainly characterized by low - low and high - high agglomeration. Socio-economic factors such as population density, road network density, urbanization rate, per capita GDP, agricultural machinery input intensity, and irrigation index were the main controlling factors for the degradation of the cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province. The interactions between cultivated land input intensity and population economic indicators, as well as the interactions among the key indicators of the intensity of cultivated land input and among population-economic indicators, would significantly affect the level of degradation risk. Measures such as zoning control to reduce source pressure, full-process monitoring, and implementing degradation remediation should be taken to control the entire lifecycle of cultivated land quality. The research results can provide theoretical and practical references for measuring and curbing cultivated land ecosystem degradation risks in Heilongjiang Province and other major grain producing areas.

Key words: cultivated land ecosystem; degradation risk; ecosystem services value; major grain producing areas; Heilongjiang Province

0 引言

耕地作为典型的半自然、半人工复合生态系统[1],在保障国家粮食安全和生态安全等方面具有重要作用[2]。然而,受自然环境变化和人类长期干扰的影响,我国耕地正面临着土壤污染、水土流失、土壤理化性质改变、固碳能力下降等一系列问题[3],耕地生态系统存在不同程度的退化风险,甚至会丧失生产能力,这将严重威胁到我国社会经济的可持续发展。因此,合理评估耕地生态系统退化风险水平及其分布特征、明晰其驱动机制、提出管控建议对开展地区耕地保护、遏制区域耕地生态系统退化、改善生态环境具有重要意义。

耕地生态系统退化风险评估属于耕地生态风险评估,是评价在人类活动等外源压力下,耕地生态系统结构和功能遭受到潜在退化可能性及退化程度的过程[4-6],是生态环境评价的重要组成部分[7]。目前众多学者在耕地及其生态风险评估方面进行了大量理论和实践探索[8-12]。从评估方法上来看,现有的研究主要聚焦于考虑景观破碎程度、离散程度等景观尺度评估[8-9],以及综合了土壤、植被、农田管理等众多要素的多指标评估[10-11]。这些研究丰富了耕地生态系统退化风险评估的理论框架,但也存在一定局限性。景观尺度的评估未充分考虑人与耕地生态系统的耦合关联,且存在评价结果对于风险管控行为的指向性不足、难以辅助政府决策等问题[12];而多指标评估数据获取成本较高、短期内难以完成大尺度的评估、且区域间由于选取指标不同其评价结果缺乏可比性。为克服以上方法的不足,近年来生态环境领域的学者尝试将生态系统服务纳入到生态风险评价框架[13-15],以充分考虑人与生态环境的互馈关系,并提高评估结果的实用性及可比性[16-17]。然而这些评估往往仅考虑了生态系统服务的正向价值,却忽视了生态系统服务负向价值在评估过程中的关键作用,对人地系统的互馈作用考虑不足。此外,大多数学者在评估耕地生态系统风险(或生态系统风险)时往往截取测度、空间分异、驱动机制、管控建议中的 2 个或者 3 个侧面进行研究,缺乏包含耕地生态系统风险的测度、分异特征、影响机制和管控建议全过程研究框架、可以辅助政府决策的综合分析[8-10,18]。

鉴于此,本文选择粮食主产区黑龙江省为研究对象,并建立测度-分异-机制-管控研究框架,通过引入生态系统服务负向价值及净价值构建耕地生态系统退化风险指数测度 2020 年研究区的耕地生态系统退化风险,进而运用空间自相关模型分析其空间分布特征,同时借助地理探测器分析研究区耕地生态系统退化风险的主控因素及影响机制,最终提出相关管控建议,以期为遏制黑龙江省耕地生态系统退化态势,实现耕地可持续利用提供理论和实践参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑龙江省(图 1)地处中国东北部,介于 121°11′~135°05′E,43°26′~53°33′N 之间,下辖 12 个地级市和 1 个地区,是我国典型的粮食主产区和北方生态安全屏障。研究区地势大致呈西北部、东南部高,东北部、西南部低的特征,主要地貌类型包括山地、丘陵和平原;气候为温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,年平均气温 0~5℃,年平均降水量 400~700 mm。研究区黑土资源丰富,土壤有机质含量较高,适宜多种农作物生长,其中主要粮食作物为水稻、玉米和大豆等。自 2011 年以来,黑龙省粮食产

量稳居全国之首，但由于长期重种轻养，过度施加农药、化肥等，研究区耕地已出现地力透支与生态水平下降等现象，耕地生态系统结构遭受破坏，严重影响粮食安全和生态安全。

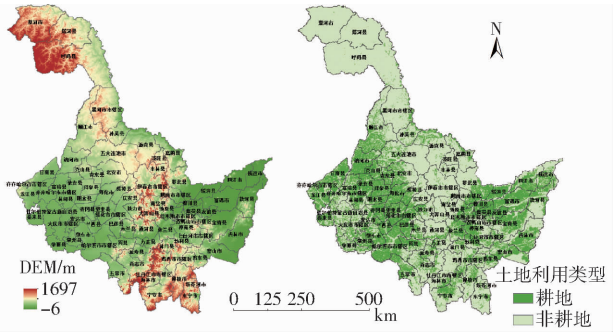


图 1　研究区地理位置及耕地分布

Fig. 1　Study area geographical location and cultivated land distribution

1.2　数据来源与处理

以黑龙江省县级行政区（包括县、县级市及市辖区，以下简称“县域”）为研究单元；鉴于统计数据可获取性，对同一地级市下辖的区进行合并处理，最终形成 79 个县域单元作为研究对象。采用的数据主要包括土地利用数据、遥感数据、气象数据以及社会经济统计数据等，将栅格数据空间分辨率统一为 30 m×30 m，投影坐标系统一为 WGS－1984－UTM－Zone－52N，具体来源如下：

（1）土地利用数据。该数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/）中的 2020 年土地利用数据集，空间分辨率为 30 m×30 m，各县域土地面积与耕地面积从该数据集中提取。

（2）遥感数据。主要包括数字高程模型（DEM）数据、归一化植被指数（NDVI）数据。其中，DEM 数据来源于 CGIAR－CSI 网站中的 SRTM 数据（http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata），空间分辨率为 30 m×30 m，所需各县域的高程及坡度均从 DEM 数据中提取得到；NDVI 数据来源于美国国家航空航天局（https://search.earthdata.nasa.gov/search），空间分辨率为 1 km×1 km。

（3）气象数据。年平均温度和年平均降雨量数据来源于地球资源数据云（http://www.gis5g.com/data/qxsj），空间分辨率为 1 km×1 km。

（4）社会经济数据。各县域的粮食作物播种面积、粮食作物产量、化肥施用量、氮肥施用总量、复合肥施用总量、GDP、农业总产值、农业机械化总动力以及公路里程数据，均来源于 2021 年《黑龙江省统计年鉴》和各地级市的统计年鉴；对于个别缺失数据使用县域耕地面积占比对市域数据进行分配。各县域人口总数、城镇人口数量和农村人口规模均来源于第七次全国人口普查数据结果；农作物播种面积参考 FU 等[19]的研究，农作物单产使用相应地级市的各农作物单产替代（考虑到相同市域单产水平相近）；有效灌溉面积从黑龙江省水利厅公开申请中获取，耗水率来源于 2020 年《黑龙江省水资源公报》，耕地实际灌溉公顷均用水量来源于 2020 年《中国水资源公报》；水土流失面积来源于 2020 年《黑龙江省水土保持公报》，水土流失治理费用来源于刘敏等[20]的研究；农药及地膜使用量从黑龙江省统计局公开申请中获取，化肥利用率和农药利用率来源于黑龙江省农业农村厅；农作物平均价格、粮食市场价格、化肥价格以及农药公顷均价格来源于 2021 年《全国农产品成本收益汇编》。

2　研究方法

2.1　耕地生态系统退化风险测度方法

2.1.1　耕地生态系统退化风险指数构建

耕地生态系统退化风险指数是用于定量化表征耕地生态系统在多元压力下可能遭受的风险及退化的可能性。当人类活动等对耕地生态系统过度消费和破坏，其产生的负面反馈作用占生态系统能够提供的净价值（生态系统服务正向价值与生态系统服务负向价值差值）比例越大，则生态系统面临退化的风险越大。因此，引入生态系统服务正负向价值构建耕地生态系统退化风险指数。计算公式为

$$D_r = V_f/(V_z - V_f) \times 100\% \tag{1}$$

式中　D_r——各县域耕地生态系统退化风险指数，%

V_z——各县域耕地生态系统服务正向价值，元

V_f——各县域耕地生态系统服务负向价值，元

2.1.2　耕地生态系统服务正向价值测算

基于谢高地等[21]提出的当量因子法核算研究区生态系统服务正向价值，根据研究区特点，选取水稻、玉米和大豆 3 类粮食作物参与耕地生态系统服务正向价值核算，其计算公式为

$$V_z = E_a S_{gd} t_e \tag{2}$$

其中

$$E_a = \frac{1}{7}\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i m_i p_i}{S_z} \tag{3}$$

式中　E_a——单位当量因子价值量，元/hm^2，约为当年全国粮食单产市场价值的 1/7

S_i——第 i 种农作物播种面积，hm^2

m_i——第 i 种农作物单产，kg/hm^2

p_i——第 i 种农作物平均价格，元/kg

S_z——农作物总播种面积，hm^2

S_{gd}——耕地面积，hm^2

t_e——单位面积农田生态系统服务价值当量,取 6.91[21]

2.1.3 耕地生态系统服务负向价值测算

耕地生态系统服务负向价值指耕作及农业生产过程中对耕地生态系统产生的负向影响价值。结合研究区的实际情况,主要考虑因温室气体排放、化肥和农药过度使用、农用地膜残留、农业水资源过量消耗及水土流失带来的损失,并采用功能价值法进行测算,计算公式为

$$V_f = V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} + V_{f4} + V_{f5} \tag{4}$$

式中 V_{f1}——因温室气体排放产生的负向价值,元

V_{f2}——因化肥和农药过度使用产生的负向价值,元

V_{f3}——因残留农用地膜产生的负向价值,元

V_{f4}——因农业水资源消耗产生的负向价值,元

V_{f5}——因水土流失产生的负向价值,元

(1)耕地中温室气体的过量排放会导致土壤固碳能力削弱、土壤质量退化,从而对耕地生态系统的健康和功能造成显著影响。因温室气体排放而产生的负向价值计算公式为[22-23]

$$V_{f1} = P_c \sum GWP_j GG_j C \tag{5}$$

其中

$$GG_j = E_{CH_4} + E_{N_2O} = S_{sd} d + \sum_{i=1}^{n} (S_i \alpha_i + C_{NFi} \beta_i + C_{CFi} \gamma_i) \tag{6}$$

式中 P_c——碳交易价格,元/kg

GWP_j——第 j 类温室气体全球变暖潜势

GG_j——第 j 类温室气体排放量,kg

C——CO_2 中 C 质量分数,取 27.27%

E_{CH_4}——耕地年 CH_4 排放量,kg

E_{N_2O}——耕地年 N_2O 排放量,kg

S_{sd}——水稻播种面积,hm^2

d——水稻的 CH_4 排放系数,取 168 kg/hm^2[24]

α_i——第 i 种农作物单位面积年本底 N_2O 排放量,kg/hm^2

C_{NFi}——第 i 种农作物氮肥施用量,kg

C_{CFi}——第 i 种农作物复合肥施用量,kg

β_i——第 i 种农作物单位面积氮肥 N_2O 排放系数,%

γ_i——第 i 种农作物单位面积复合肥 N_2O 排放系数,%

其中 P_c 采用瑞典碳税率(150 美元/t,按 2020 年年底汇率折算)与中国造林成本(260 元/t)平均值,得出 P_c 为 0.643 3 元/kg;GWP_j 表示各类温室气体对于全球变暖的影响程度,若 1 kg CO_2 的 GWP 为 1,则 1 kg CH_4 的 GWP 为 21,1 kg N_2O 的 GWP 为 310[25];而在测算温室气体排放量(GG_j)时,从已有研究可知[23,25-26],由于耕地生态系统进行呼吸作用所排出的 CO_2 可被光合作用所消耗,故不考虑其 CO_2 排放量,因 CH_4 在旱地中排放量很少,可忽略不计,所以只计算在水稻种植过程中的 CH_4 排放量;此外,温室气体的主要排放源还包括本底(未施肥)和施肥(氮肥和复合肥)的 N_2O 排放量;对于第 i 种农作物氮肥施用量(C_{NFi})来说,由于在本文中缺少各县域不同农作物之间氮肥施用量,故引入不同作物氮肥使用比例(农作物氮肥习惯施用总量与农作物氮肥施用总量比值)对各县域氮肥施用总量进行分配,其中不同农作物习惯氮肥施用总量通过实地调研可得;并根据文献[26]确定 α_i、β_i、γ_i,如表 1 所示。

表 1 主要农作物的 N_2O 排放系数

Tab.1 Nitrous oxide emission factors of major crops

参数	水稻	玉米	大豆
本底排放量/(kg·hm^{-2})	0.24	2.53	2.29
氮肥排放系数/%	0.30	0.83	6.61
复合肥排放系数/%		0.11	

(2)化肥和农药过度使用不但会破坏土壤结构、造成土壤盐碱化及酸化,还会污染地表水和地下水,使耕地的生态系统结构和功能发生改变。因化肥和农药过度使用而产生的负向价值计算公式为[22]

$$V_{f2} = C_{hf}(1 - R_{hf}) P_{hf} + C_{ny}(1 - R_{ny}) P_{ny} \tag{7}$$

式中 C_{hf}——化肥施用量,kg

C_{ny}——农药使用量,kg

R_{hf}——化肥利用率,取 42.1%

R_{ny}——农药利用率,取 45%

P_{hf}——化肥价格,元/kg

P_{ny}——农药价格(农药公顷均价格×耕地面积×农药利用率/农药使用量),元/kg

(3)残留在耕地中的地膜不仅阻隔水肥运输,而且影响作物对于养分的吸收,导致作物减产,从而产生负向价值。因地膜残留而产生的负向价值计算公式为[22]

$$V_{f3} = S_{dm} R_{dm} m_{ls} P_{ls} R_{ls} \tag{8}$$

式中 S_{dm}——地膜覆盖面积,hm^2

R_{dm}——地膜残留比率,取 47%[23]

R_{ls}——粮食损失率,取 10%[23]

m_{ls}——粮食单产,kg/hm^2

P_{ls}——粮食市场价格,元/kg

(4)农业灌溉会显著提高物质产品的供给能力,但也会对耕地生态系统产生许多负面影响,比如

土壤盐碱化、农业面源污染扩散等问题。因农业水资源消耗产生的负向价值计算公式为[22]

$$V_{f4} = C_{ns} R_{ns} P_{ns} \tag{9}$$

式中　C_{ns}——农业用水量(耕地实际灌溉公顷均用水量与有效灌溉面积乘积),m^3

R_{ns}——耗水率,取 65.5%

P_{ns}——水库蓄水成本,取 1.17 元/m^3[23]

(5)东北黑土耕地长期遭受水土流失的威胁,使得耕地变“薄”、变“瘦”,形成侵蚀沟,对耕地生态系统造成严重破坏。因水土流失产生的负向价值计算公式为[27]

$$V_{f5} = S_{st} P_{st} \tag{10}$$

式中　S_{st}——水土流失的耕地面积,hm^2

P_{st}——单位面积水土流失年治理费用,元/hm^2

2.2　耕地生态系统退化风险空间分异测度

空间自相关模型是衡量特定区域某一变量在整体空间上的相关性以及局部空间集聚特征的重要手段,具体分为全局空间自相关(Global Moran'I)与局部空间自相关(Local Moran'I)。I 值域为[-1,1],I 大于 0 时,表示耕地生态系统退化风险的空间分布存在正相关的集聚特征;I 小于 0 时,表示其分布呈负相关性,在区域内呈现离散特征;I 等于 0 时,则表示随机分布,无关联性。

2.3　耕地生态系统退化风险影响因素分析

2.3.1　影响因素选取

耕地生态系统退化风险受自然禀赋特征及社会经济发展压力等多重因素影响,参考已有研究成果及研究区实际情况[2,28-31],并考虑数据可获取性,从自然条件和社会经济条件两方面出发构建准则层,并进一步细化选取 15 个指标,形成黑龙江省耕地生态系统退化风险影响因素指标体系,如表 2 所示。

表 2　黑龙江省耕地生态系统退化风险影响因素

Tab. 2　Factors affecting risk of cultivated land ecosystem degradation in Heilongjiang Province

准则层	指标层	指标解释
自然条件	高程 X_1(m)	表示海拔对耕地分布及质量的影响
	坡度 X_2((°))	反映地形陡峭程度、人类开发活动的难易程度及水土流失压力
	年平均温度 X_3(℃)	气温条件影响耕地生产能力,对维持耕地生态系统服务及健康水平有重要作用
	年平均降雨量 X_4(mm)	反映研究单元耕地生态系统水资源的自然供给情况
	NDVI X_5(%)	表征植被覆盖度,综合反映耕地土壤健康水平
社会经济条件	人口密度 X_6(人/hm^2)	研究单元年末人口总数与土地面积之比,反映人口对耕地生态系统供给能力产生的压力及人类活动对耕地生态系统的干扰程度
	路网密度 X_7(km/hm^2)	研究单元内公路里程总长度与土地面积之比,反映人类活动可及度对生态系统连通性的影响
	城镇化率 X_8(%)	研究单元内城镇人口占总人口百分比,表示城镇化发展对耕地利用的压力和强度
	人均 GDP X_9(万元/人)	研究单元内地区生产总值与人口总数比值,表征区域经济发展状况
	地均农业生产总值 X_{10}(万元/hm^2)	研究单元内农业总产值与耕地面积比值,反映农业发展情况
	人均耕地面积 X_{11}(hm^2/人)	研究单元内耕地面积与农村人口规模比值,表征人类对耕地的占有水平和利用压力
	农作物种植结构 X_{12}(%)	研究单元内粮食作物播种面积占农作物总播种面积百分比,反映不同类型农作物种植和管理方式的异质性
	农业机械投入强度 X_{13}(kW/hm^2)	研究单元内农业机械化总动力与农作物总播种面积比值,表征农业现代化水平及其对耕地土壤结构的影响
	灌溉指数 X_{14}(%)	研究单元内有效灌溉面积占耕地面积百分比,反映耕地水土协调状态
	单位面积农业财政投入 X_{15}(万元/hm^2)	研究单元内农林水方面的财政支出与耕地面积比值,表示政府用于耕地相关建设的经济投入

2.3.2　地理探测器

地理探测器可用于分析变量空间分异性并揭示其背后驱动机制,共包括 4 个探测器。其中,因子探测器可以检测各影响因素 X(自变量)在多大程度上解释了因变量 Y 的空间分异,并用 q 来度量。q 取值范围为[0,1],q 越大表明自变量 X 对因变量 Y 的影响越大,反之则越小。

交互探测器用以识别不同影响因素 X 之间的交互作用,评估 2 个影响因素共同作用时,是否会增强或削弱对因变量 Y 的解释能力,或判断这些影响因素对 Y 的影响是否彼此独立,2 个因素间的交互作用类型分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种。

3　结果与分析

3.1　耕地生态系统退化风险空间分异特征

3.1.1　耕地生态系统退化风险等级分布特征

根据式(1)~(10)测算出研究区各县域耕地生

态系统正、负向价值及退化风险指数(D_r),结果如图 2 所示。研究区 D_r 最低值为 3.76%,出现在伊春市大箐山县;最高值为 48.89%,位于大庆市肇源县(图 2i)。为了更好地表征退化风险分布特征,采用自然断点法将研究区 2020 年的 D_r 进行分类,结果划分为 5 类,低退化风险($D_r \leqslant 12.77\%$)、较低退化风险($12.77\% < D_r \leqslant 18.87\%$)、中等退化风险($18.87\% < D_r \leqslant 25.53\%$)、较高退化风险($25.53\% < D_r \leqslant 32.10\%$)和高退化风险($D_r > 32.10\%$)(图 3)。由图 3 可以看出,黑龙江省 79 个县域中,有 11 个为高退化风险,12 个为较高退化风险,26 个为中等退化风险;中等退化风险及以上区域占总县域数量的 62.03%,且区域耕地生态系统退化风险指数平均值为 22.25%,已处于中等退化水平,表明目前研究区耕地生态系统面临较为严峻的退化形势,耕地生态系统保护与恢复工程刻不容缓。

从空间格局上来看,黑龙江省耕地生态系统退化风险在空间上表现出明显的异质性,大致呈西高东低的分布格局(图 3)。中等及以上退化风险区极大多数分布在研究区西部和西南部,呈聚集趋势,为黑龙江省人口密集、经济较为发达地区。低退化风险区及较低退化风险区主要分布在研究区的南北轴带(除中部地区)及东部区域。

3.1.2 耕地生态系统退化风险空间自相关分析

借助 GeoDa 软件中的空间分析工具,计算研究区 D_r 单变量 Global Moran'I 以确定黑龙江省耕地生态系统退化风险的空间相关性,并进一步通过 Local Moran'I 分析其局部空间集聚状况,结果如图 4 所示。2020 年研究区 Global Moran'I 为 0.263,Z 值为 4.584,且通过 $p = 0.001$ 显著性检验,表明研究区耕地生态系统退化风险在空间分布上存在显著的正相关性且存在空间集聚效应。

从局部自相关结果来看,2020 年黑龙江省耕地生态系统退化风险呈现 4 种集聚类型,并以低-低和高-高集聚为主(图 4)。低-低集聚县域共有 13 个,主要位于在牡丹江市中部、鹤岗市、伊春市北部及其邻近的县域;高-高集聚县域共 6 个,主要分布在研究区西部及西南部,包括哈尔滨市的宾县和延寿县,齐齐哈尔市市辖区、龙江县、讷河市,大庆市的杜尔伯特蒙古族自治县;低-高集聚区(5 个)与高-高集聚区相邻分布,并有少量的高-低集聚区域(3 个)在低-低集聚区域附近呈零星分布。

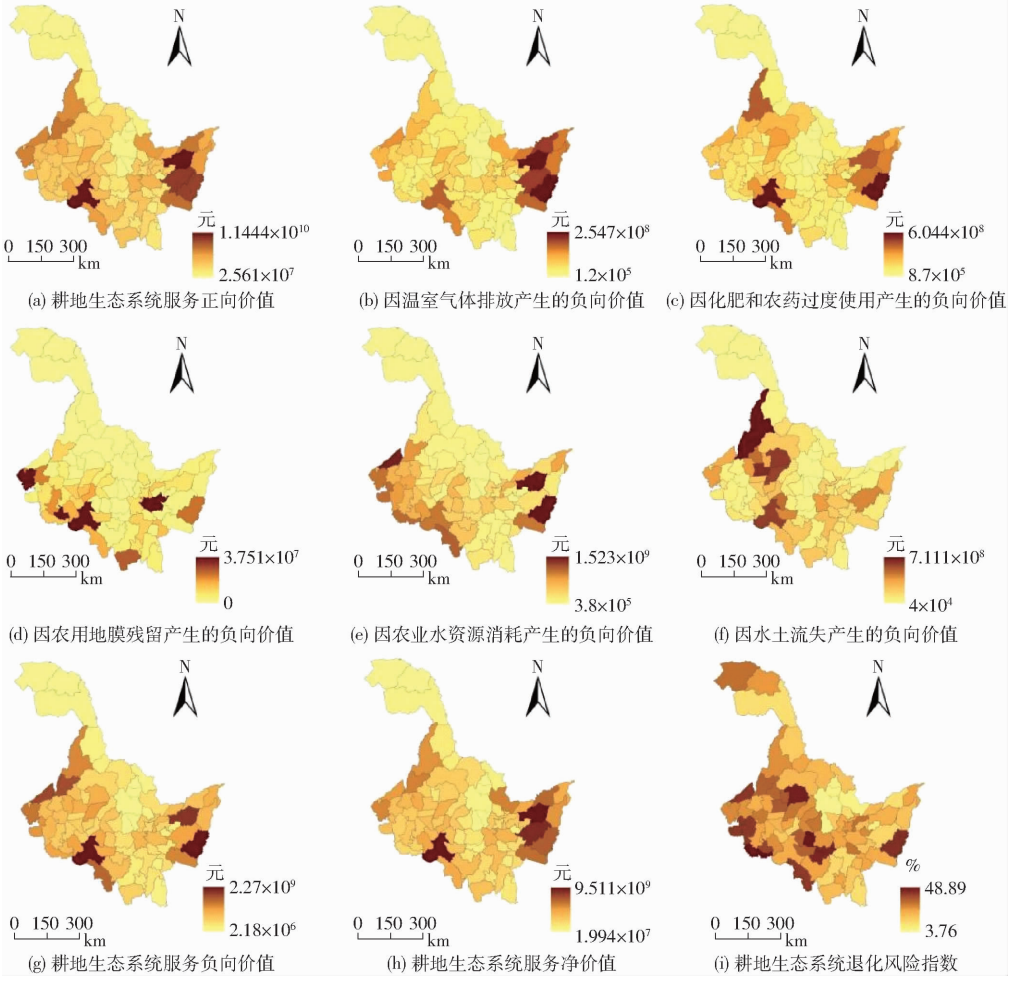


图 2 耕地生态系统服务价值及退化风险测算结果

Fig. 2 Results of calculation of ecosystem service value and degradation risk index of cultivated land

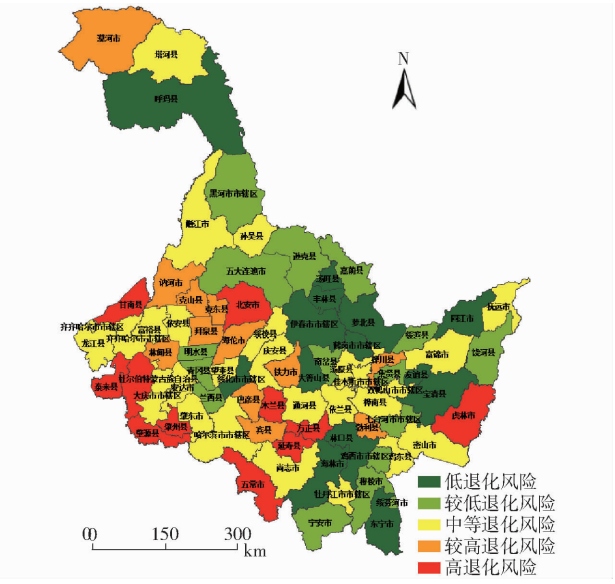


图 3　黑龙江省耕地生态系统退化风险等级

Fig. 3　Degradation risk levels of cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province

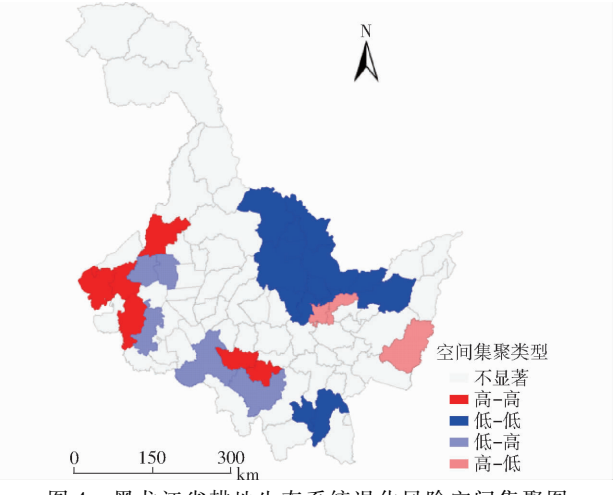


图 4　黑龙江省耕地生态系统退化风险空间集聚图

Fig. 4　Spatial agglomeration map of degradation risk of cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province

3.2　耕地生态系统退化风险影响因素

以黑龙江省各县域 D_r 为因变量 Y，以 15 个影响因素为自变量 X_i（$i=1,2,\cdots,15$），运用地理探测器分析黑龙江省 2020 年耕地生态系统退化风险主要影响因素和各因素间的交互作用特征。由于地理探测器要求 X_i 必须为类型量，故依据自然间断点分类法对影响因素数据进行重分类处理，并创建渔网、建立采样点，将剔除异常值的采样数据导入地理探测器，进行因子探测和交互探测，15 个影响因素均通过因子探测中的显著性检验（$p<0.05$），结果如图 5、6 所示。

3.2.1　因子探测结果

研究区各因素 q 值（图 5）从高到低依次为：灌溉指数（0.470）、农业机械投入强度（0.281）、人口密度（0.223）、城镇化率（0.174）、路网密度（0.160）、人均 GDP（0.117）、年平均温度（0.098）、高程（0.092）、人均耕地面积（0.084）、单位面积农业财政投入（0.065）、坡度（0.063）、地均农业生产总值（0.060）、年平均降雨量（0.059）、NDVI（0.059）、农作物种植结构（0.053），表明社会经济因素对研究区 D_r 的影响强度显著强于自然因素。

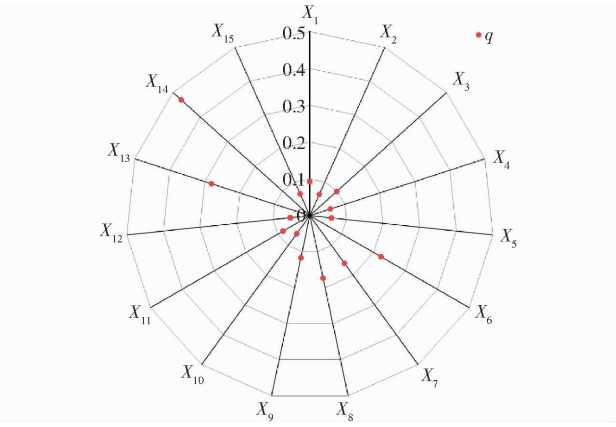


图 5　黑龙江省耕地生态系统退化风险影响因子探测结果

Fig. 5　Results of detection of influencing factors on degradation risk of cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province

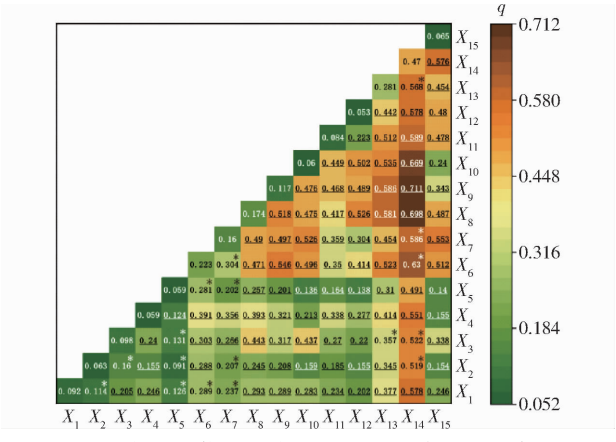


图 6　黑龙江省耕地生态系统退化风险影响因素交互作用结果

Fig. 6　Results of interaction of influencing factors on degradation risk of cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province

具体来看，在社会经济因素中，人口密度、路网密度、城镇化率、人均 GDP、农业机械投入强度和灌溉指数的 q 值均大于 0.1，对研究区 D_r 分布的解释力较强，为主控因素。自然因素中，高程和年平均温度对 D_r 分布的解释力相对较强。

3.2.2　交互探测结果

采用地理探测器模型中交互探测器来分析各因素间的交互作用，结果如图 6 所示。总体上，两两交互类型表现为非线性增强（图 6 中标注为下划线）

和双因子增强(图 6 中标注为 *),表明 15 个影响因素中任意两因素交互作用对 D_r 的影响均超过单独作用,说明黑龙江省耕地生态系统退化并不是单一影响因素造成的,而是多影响因素交互耦合作用的结果。此外,社会经济因素间的交互作用明显高于自然因素间的交互作用,但自然因素(如高程、年平均温度、年平均降雨量)与社会经济因素交互后,其对耕地生态系统退化风险的解释能力呈现增强态势,表明社会经济因素是研究区耕地生态系统退化的主要驱动力,同时敏感的自然环境与人类活动共同作用决定了耕地生态系统退化程度。

具体来看,灌溉指数与人均 GDP、城镇化率、地均农业生产总值和人口密度的交互作用最强,q 值分别达到 0.711、0.698、0.669 和 0.630。这表明表征耕地投入强度的灌溉指数与区域经济发展压力、人口因素相互作用会显著影响退化风险水平。此外,单位面积农业财政投入与灌溉指数、农业机械投入强度交互,城镇化率、人均 GDP 及地均生产总值间交互后,q 值均在 0.45 以上,表明耕地投入强度关键指标间相互作用及人口经济指标间相互作用会显著影响退化风险水平。虽然人均耕地面积本身不是主控因素,但与人均 GDP 及地均农业生产总值交互后解释力明显增强,表明当某区域人均耕地面积较小时,再叠加经济发展的压力会对耕地生态系统退化产生显著影响。

4 讨论

4.1 耕地生态系统退化风险空间分异格局

研究区耕地生态系统退化风险在空间上表现出明显的异质性,大致呈现西高东低的空间格局,这与其他学者的研究结论基本相同[28,32]。例如:宋戈等[28]在对黑龙江省各县域的耕地系统安全预警问题进行研究时发现,2014 年黑龙江省耕地系统安全预警整体表现为西部警情水平最高,东部次之,南北轴带地区(包括中部)最低。王子源等[32]基于暴露度-敏感性-适应能力框架的脆弱性评价模型研究黑龙江省黑土区各县域的耕地利用系统脆弱性,得出 2020 年黑龙江省黑土区耕地利用系统脆弱性呈现西高东低的空间分布状态。

本研究中等以上退化风险区占研究区总县域数量的 62.03%,主要分布在研究区西部,且这些县域主要分为两类,第一类为哈尔滨市、齐齐哈尔市、大庆市、佳木斯市、鸡西市、绥化市县域,共同特征是海拔较低(平均海拔为 48 ~ 387 m)、人口密度较大(0.18 ~ 6.85 人/hm^2)、经济相对发达,同时大部分县域都是我国重要的商品粮基地县,如五常市、克山县、富锦市、肇州市和肇东县等。受发展经济及保障粮食安全双重任务影响,该区域农业现代化水平较高且农药、化肥及农业机械等耕地投入更多,即人类活动对耕地生态系统干预程度较高[28,32],导致耕地生态系统压力大,退化风险也相对较高。哈尔滨市、大庆市和齐齐哈尔市极大多数县域的耕地生态系统退化风险均处于较高退化风险或高退化风险水平,且哈尔滨市宾县和延寿县,齐齐哈尔市市辖区、龙江县、讷河市,大庆市杜尔伯特蒙古族自治县为高-高集聚区域,可能的原因是这些县域位于黑龙江省西部半干旱区[33],降水补给不足叠加农业灌溉用水需求大,从而导致该区域因农业水资源消耗产生的负向价值较高(图 2e);且水资源过度消耗与土壤盐碱化间存在紧密的双向反馈机制,尤其在大庆市这种盐碱地分布较多的区域更为明显。此外,齐齐哈尔市克东县、克山县、拜泉县和讷河市等县域受水力侵蚀影响严重,因水土流失产生的负向价值大(图 2f),加剧耕地生态系统退化风险[32,34]。第二类为牡丹江市市辖区、七台河市勃利县、黑河市嫩江市、孙吴县和北安市以及大兴安岭地区的漠河市、塔河县,相较于第一类县域,此类县域海拔较高(图 1),区域内山地丘陵较多,坡度大,导致耕地面积小、分布零散且坡耕地较多;同时,大兴安岭地区的漠河市和塔河县纬度过高,区域水热条件限制水稻和玉米的种植[35],其耕地生态系统服务正向价值与净价值较低(图 2a、2h),在面对外源压力时会增加退化风险。

而较低退化风险区和低退化风险区主要分布在南北轴带的山区及东部三江平原的多数县域(图 3)。位于南北轴带的牡丹江市、伊春市、黑河市和呼玛县坐落长白山脉、张广才岭、小兴安岭山脉和伊勒呼里山等山脉,林业资源丰富,农业经济占比较低、耕地利用强度较小;且临近黑龙江和牡丹江等河流,水资源相对充足,因农业水资源消耗产生的负向价值较少(图 2e),因此,该区域的耕地生态系统退化风险较低,且低-低集聚区域也分布其中。而双鸭山市的集贤县、友谊县、宝清县、饶河县,佳木斯市的同江市等县域地处三江平原及其边缘地带,黑土资源丰富,土壤条件较好,因此该区域的耕地生态正向价值与净价值较高(图 2a、2h),使其耕地生态系统退化风险呈现较低水平。

4.2 耕地生态系统退化风险主控因素及驱动机制

已有研究发现,虽然由于研究区和研究时段差异,不同自然因素和社会经济因素对于耕地或耕地生态系统退化的影响程度不同[2,28-29],但一般来说,社会经济因素比自然因素的影响作用更为明显,

各因子交互后对耕地生态系统退化的解释力均有增强[2,28-30]。本研究中，主控因素均为社会经济指标（图 5），研究结果与其他学者的结论基本一致[2,28]。主要的原因可能在于社会经济因素及其交互影响可直接改变土地利用方式、结构和强度[36]，在短期内对耕地生态系统施加较强的压力，进而改变耕地土壤的结构及理化性质，造成耕地生态系统退化风险加剧。同时，研究显示自然因素中年平均温度和高程对研究区生态系统退化风险也有较强的解释力（图 5），可能的原因在于，黑龙江省耕地主要分布在海拔相对较低的平原地区，而对于海拔较高、年平均气温较低的区域，耕地相对较少且人类对耕地扰动强度小，同时该类区域地表植被以林草为主，林地和草地可有效改善耕地生态环境[28]，造成海拔和年平均气温对研究区耕地生态系统退化风险也有一定的影响。

此外，社会经济因素中人口密度、路网密度、城镇化率、人均 GDP、农业机械投入强度和灌溉指数是黑龙江省耕地生态系统退化的主控因素（图 5），且耕地投入强度与区域经济发展压力相互作用、耕地投入强度关键指标间相互作用及人口经济指标间相互作用会显著影响退化风险水平，这与相关学者的研究结论相似[28,30-31]。人口密度、城镇化率、人均 GDP 表征人口及经济发展对耕地生态系统带来的压力，当人口密度大、城镇化率较高，会带来城镇的大规模扩张，这一方面会导致非农用地占用耕地，另一方面在保证国家粮食安全及实现地方经济发展等压力下对存量耕地的利用强度会相应增加，进而导致耕地生态系统退化风险加剧[37]。路网密度、灌溉指数及农业机械投入强度代表对耕地的投入与农业现代化水平；当路网密度过高时，人类对耕地的扰动强度增大，同时耕地生态系统连通性减弱[38]，进而对耕地生态系统的稳定性产生不利影响，增加退化风险；由于全球气候变暖、我国水稻种植区域北扩，导致黑龙江省水稻种植面积大幅增加[39]，加之研究区对旱地的灌溉导致地下水资源过度消耗，同时灌溉等也会导致化肥农药面源污染扩散，部分区域也出现土壤盐碱化[29]，加重耕地生态系统压力；而黑龙江省大部分耕地集中在三江平原和松嫩平原等地区，这些区域地势平坦、土地连片集中、农业机械投入强度大，农业机械大量使用会诱发耕地土壤压实等问题，导致土壤结构发生改变，蓄水能力下降，造成耕地生态系统退化[40]。具体驱动机制如图 7 所示。

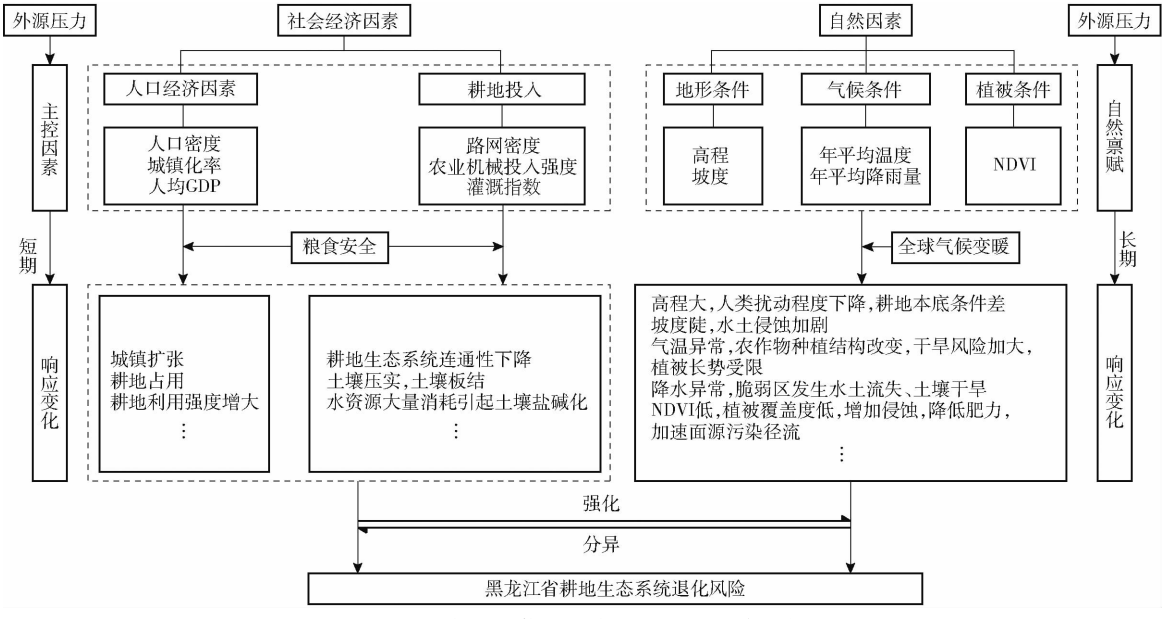


图 7　黑龙江省耕地生态系统退化风险机制

Fig. 7　Degradation risk mechanism of cultivated land ecosystem in Heilongjiang Province

4.3　耕地生态系统退化管控建议

研究显示，受控于人口经济因素及耕地投入强度等多要素的综合影响，研究区耕地生态系统面临较为严峻形势，且各县域退化水平呈现分异状态（图 3）。为缓解黑龙江省耕地生态系统的退化态势，提高耕地生态系统韧性及健康水平以保障粮食安全，应针对耕地生态系统退化风险相对较大的脆弱区域，制定分区管控政策，从源头降低耕地生态压力。

针对研究区耕地生态系统退化风险中等及以上区域，如哈尔滨市、齐齐哈尔市、大庆市的全部县域以及鸡西市、佳木斯市、绥化市的多数县域，鉴于该区域人口密度大、人类对耕地干预程度较高的特点，在耕地利用上应实施“技术投入 + 政策引导（管控）”的用养结合策略，针对农药化肥负向价值较高

区域,通过测土配方、有机肥替代、灾害监测、生物防治等技术手段来减少化肥农药的过量施用;针对农业机械投入强度较大,黑土耕地变“硬”区域,可采用免耕、少耕、保墒耕作技术或推广保护性耕作机械以适度降低农业机械投入强度,以减少对土壤结构的破坏;针对水资源消耗较大及盐碱化风险较高区域,通过选择节水型作物并配合轮作间作等来优化种植结构,从源头端减少水资源消耗及盐化风险;同时引入滴灌、喷灌系统,并根据气候条件及作物生长周期调整灌溉频率,从消耗端降低风险。在政策引导(管控)方面,应坚守耕地红线、严控建设用地扩张对耕地的占用,推动生态农业转型、落实生态补偿政策、加强水土保持并推动农业污染防治。总之,通过技术投入和政策引导(管控),从“数量-质量-生态”3 方面减小耕地生态系统负向压力,做到用养结合,最终降低耕地生态系统退化风险。针对耕地生态系统退化风险较低的县域,如牡丹江市、伊春市和黑河市等,这类区域海拔较高,虽然目前耕地生态系统退化风险较低,但鉴于该类县域生态系统比较敏感、耕地利用弹性低、扰动后较难恢复的特点,应实施“生态保护 + 生态农业”并行的管控策略。在生态保护方面,对于海拔较高、水土流失风险较大区域,一方面应继续实施退耕还林(草)政策,另一方面推广等高种植、实施水土保持工程以降低水土流失的风险;在生态农业推广方面,应结合高海拔、气温低等特点,优选耐寒作物,推广多元化作物种植组合发展生态农业,同时推广有机农业、景观生态农业、循环生态农业来维持耕地生态系统平衡。

此外,针对整个研究区,也应借助“天-空-地”立体监测平台进行耕地生态系统退化水平动态监测,并预警退化风险;同时,针对不同的耕地生态系统退化类型(土壤污染、土壤板结、土壤侵蚀、盐碱化等),加大资金投入、进行综合治理。总之,通过降低源头压力、进行全程监控、实施退化治理等措施进行耕地质量全生命周期管控,以应对全球气候变化、社会经济发展及国际形势变化对耕地生态系统造成的压力,全面保障国家粮食安全。

4.4 不足与展望

受数据可获得性和研究条件限制,本文仍存在一些不足之处,需在以后的研究中继续深入和完善。首先,在县域尺度下,部分数据(尤其是社会经济统计数据)由于统计方法、统计尺度、数据缺失等的影响,无法全面获取多时期数据,因此未能开展长时间序列的耕地生态系统退化风险动态对比研究。此外,在耕地生态退化风险指数构建中,尽管基于现有研究及研究区特点考虑了温室气体排放、化肥农药过度使用和农用地膜残留等 5 类负向价值,但由于耕地生态系统的复杂性,仍存在未被充分考虑的其他潜在因素,如生物多样性丧失、土壤微生物变化和畜禽粪便污染等,这些都可能对耕地生态系统退化风险及其空间分布产生重要影响。未来研究应完善耕地生态系统退化风险的测度体系,开展长时间尺度的动态对比,增加研究的现势性,弥补当前研究不足。

5 结论

(1)2020 年研究区各县域耕地生态系统退化风险存在差别,中等退化风险及以上区域占总县域数量的 62.03%,且区域耕地生态系统退化风险指数平均值为 22.25%,已处于中等退化风险水平,研究区耕地生态系统面临较为严峻的退化形势。

(2)黑龙江省耕地生态系统退化风险在空间上存在明显的异质性,大致呈西高东低的分布格局。中等以上退化风险区主要分布在研究区西部及西南部,呈聚集趋势,为黑龙江省人口密集、经济较为发达地区;低退化风险区及较低退化风险区主要分布在研究区南北轴带(除中部地区)及东部区域;并呈现以低-低和高-高集聚为主的集聚特征。

(3)社会经济因素对研究区耕地生态系统退化风险的影响强度显著强于自然因素。人口密度、路网密度、城镇化率、人均 GDP、农业机械投入强度和灌溉指数是黑龙江省耕地生态系统退化的主控因素;自然因素中,高程和年平均温度解释力较强。

(4)因子交互作用对耕地生态系统退化风险的影响均超过单独作用,交互类型为非线性增强和双因子增强。社会经济因素间的交互作用明显高于自然因素间的交互作用,耕地投入强度与人口经济指标间相互作用、耕地投入强度的关键指标间相互作用及人口经济因素指标间相互作用会显著影响退化风险水平。

(5)为缓解黑龙江省耕地生态系统的退化态势,应制定分区管控政策,同时应通过降低源头压力、进行全程监控、实施退化治理等措施进行耕地质量全生命周期管控,以应对全球气候变化、社会经济发展及国际形势变化对耕地生态系统造成的压力,全面保障国家粮食安全。

参 考 文 献

[1] 王嘉怡,李国煜,方晓倩,等.“社会-生态系统”视角下耕地生态系统服务内涵解析与研究框架[J].生态学报,2024,

44(15):6881 - 6891.
WANG Jiayi, LI Guoyu, FANG Xiaoqian, et al. Exploring the connotation and research framework of cultivated land ecosystem services from the perspective of social - ecological systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6881 - 6891. (in Chinese)

[2] 王林林,范晓梅.基于 BFAST 算法和多源数据的黄河三角洲耕地退化演变及驱动因素分析[J].地球信息科学学报,2023,25(11):2218 - 2231.
WANG Linlin, FAN Xiaomei. Analysis of the degradation evolution and driving factors of cultivated land in the Yellow River Delta based on the BFAST algorithm and multi-source data[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(11): 2218 - 2231. (in Chinese)

[3] 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.
LÜ Wenbao, XU Zhanjun, YANG Liqi, et al. Evaluation of the cultivated land ecosystem stability based on multi-source remote sensing data: a case study of Fenhe River Basin[J]. China Environmental Science, 2024, 44(5): 2937 - 2947. (in Chinese)

[4] 隋虹均,宋戈,高佳.东北黑土区典型地域耕地生态退化时空分异——以富锦市为例[J].自然资源学报,2022,37(9):2277 - 2291.
SUI Hongjun, SONG Ge, GAO Jia. Spatio-temporal differentiation of cultivated land ecological degradation in typical black soil regions of Northeast China: a case study of Fujin City[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2277 - 2291. (in Chinese)

[5] LI X, SHI Z, XING Z, et al. Dynamic evaluation of cropland degradation risk by combining multi-temporal remote sensing and geographical data in the black soil region of Jilin Province, China[J]. Applied Geography, 2023, 154: 102920.

[6] ALI R R, KAWY W A M A. Land degradation risk assessment of El Fayoum depression, Egypt[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(8):2767 - 2776.

[7] 孙洪波,杨桂山,朱天明,等.经济快速发展地区土地利用生态风险评价——以昆山市为例[J].资源科学,2010,32(3):540 - 546.
SUN Hongbo, YANG Guishan, ZHU Tianming, et al. Assessment of land use ecological risks in rapidly developing regions: a case study on Kunshan City[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 540 - 546. (in Chinese)

[8] 赵馨,周忠发,朱孟,等.基于景观格局的西南山区耕地生态风险研究[J].水土保持研究,2020,27(6):362 - 369,376.
ZHAO Xin, ZHOU Zhongfa, ZHU Meng, et al. Research on ecological risk of Karst rocky desertification cultivated land based on landscape pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 362 - 369,376. (in Chinese)

[9] 舒翰俊,范顺祥,姜亚东,等.内蒙古耕地景观生态风险评价及生态修复分区[J].地球科学与环境学报,2023,45(4):895 - 906.
SHU Hanjun, FAN Shunxiang, JIANG Yadong, et al. Landscape ecological risk assessment and ecological restoration zoning of cultivated land in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 895 - 906. (in Chinese)

[10] 于婧,聂艳,景高了,等.基于生态风险分析的耕地质量退化风险评价——以后湖农场为例[J].资源科学,2009,31(2):330 - 335.
YU Jing, NIE Yan, JING Gaole, et al. Cultivated land quality degradation risk evaluation based on ecological risk analysis[J]. Resources Science, 2009, 31(2): 330 - 335. (in Chinese)

[11] 原伟鹏,刘新平.基于熵权-集对模型的耕地面源污染生态风险评价与防控——以新疆昌吉州为例[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):630 - 639.
YUAN Weipeng, LIU Xinping. Ecological risk assessment and control of non-point source pollution in cultivated land based on the entropy weight - set pair model: using Changji Prefecture, Xinjiang, China as an example[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(5): 630 - 639. (in Chinese)

[12] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664 - 677.
PENG Jian, DANG Weixiong, LIU Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664 - 677. (in Chinese)

[13] 贺祥,姚尧.基于生态系统服务供需对喀斯特山区生态风险分析[J].水土保持研究,2020,27(5):202 - 212,220.
HE Xiang, YAO Yao. Analysis of ecological risk based on supply and demand of ecosystem services in Karst mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 202 - 212,220. (in Chinese)

[14] 陈峰,李红波,张安录.基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J].地理学报,2019,74(3):432 - 445.
CHEN Feng, LI Hongbo, ZHANG Anlu. Ecological risk assessment based on terrestrial ecosystem services in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 432 - 445. (in Chinese)

[15] 石龙宇,杜宾宾,陈丁楷.基于生态系统服务价值的城市生态风险评价[J].环境科学与技术,2021,44(2):203 - 210.
SHI Longyu, DU Binbin, CHEN Dingkai. Assessment of urban ecological risks based on valuation of ecosystem services[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(2): 203 - 210. (in Chinese)

[16] 康鹏,陈卫平,王美娥.基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1192 - 1203.

KANG Peng, CHEN Weiping, WANG Meie. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1192 - 1203. (in Chinese)

[17] GALIC N, SCHMOLKE A, FORBES V, et al. The role of ecological models in linking ecological risk assessment to ecosystem services in agroecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2012, 415(2): 93 - 100.

[18] 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[J].自然资源学报,2021,36(11):2892 - 2912.
SHI Fei, YANG Qingyuan, WANG Cheng, 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[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(11): 2892 - 2912. (in Chinese)

[19] FU X, DONG Y, LI J, et al. Mapping crop type in Northeast China during 2013—2021 using automatic sampling and tile-based image classification[J]. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation, 2023, 117:15.

[20] 刘敏,包钢.荒漠化经济损失分析及其防治对策——以山西为例[J].经济问题,2007(2):119 - 120.

[21] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189 - 196.
XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189 - 196. (in Chinese)

[22] 孙希超,赵晋宇,王伟.山东省农田生态系统服务价值时空变化特征分析[J].农业环境科学学报,2023,42(12):2674 - 2686.
SUN Xichao, ZHAO Jinyu, WANG Wei. Analysis of spatiotemporal variation characteristics of farmland ecosystem service values in Shandong Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(12): 2674 - 2686. (in Chinese)

[23] 刘利花,张丙昕,刘向华.粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J].农业工程学报,2020,36(19):252 - 263.
LIU Lihua, ZHANG Bingxin, LIU Xianghua. Compensation of provincial cultivated land protection in China from the dual perspectives of food security and ecological security[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 252 - 263. (in Chinese)

[24] 国家发展与改革委员会.省级温室气体清单编制指南(试行)[EB/OL].[2014 - 05 - 22]. http://www.sdpc.gov.cn/.

[25] 元媛,刘金铜,靳占忠.栾城县农田生态系统服务功能正负效应综合评价[J].生态学杂志,2011,30(12):2809 - 2814.
YUAN Yuan, LIU Jintong, JIN Zhanzhong. An integrated assessment of positive and negative effects of high-yielding cropland ecosystem services in Luancheng County, Hebei Province of North China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2809 - 2814. (in Chinese)

[26] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):23 - 29.
MIN Jisheng, HU Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population Resources and Environment, 2012, 22(7): 23 - 29. (in Chinese)

[27] 张军涛.鄱阳湖湿地生态环境损失价值初步核算[J].统计研究,2004(8):9 - 12.
ZHANG Juntao. Preliminarily accounting the value of zoological environmental losses of the wetland of Poyang Lake[J]. Statistical Research, 2004(8): 9 - 12. (in Chinese)

[28] 宋戈,陈藜藜,邹朝晖.黑龙江省耕地系统安全预警及其驱动因素空间分异[J].农业工程学报,2018,34(3):1 - 9.
SONG Ge, CHEN Lili, ZOU Zhaohui. Spatial heterogeneity of early-warning status of cultivated land system security and its driving factors in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 1 - 9. (in Chinese)

[29] 宋戈,蔡钊阳,隋虹均,等.基于质量和生态互馈的下辽河平原耕地退化的影响机理及治理对策[J].农业工程学报,2024,40(17):273 - 282.
SONG Ge, CAI Zhaoyang, SUI Hongjun, et al. Influence mechanism and governance strategies of cultivated land degradation in Lower Liaohe Plain from the mutual feedback perspective of quality and ecology[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17): 273 - 282. (in Chinese)

[30] 李卓,查思含,霍伟,等.耕地生产力隐性退化遥感监测与影响因素分析[J].农业机械学报,2022,53(4):363 - 371.
LI Zhuo, ZHA Sihan, HUO Wei, et al. Remote sensing monitoring of recessive degradation for cultivated land productivity and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 363 - 371. (in Chinese)

[31] 隋虹均,任高锋,于会胜,等.东北黑土区典型地域耕地质量退化影响因素的空间非平稳性作用效应——以富锦市为例[J].中国土地科学,2024,38(11):83 - 93.
SUI Hongjun, REN Gaofeng, YU Huisheng, et al. Spatial non-stationary effects of factors affecting cultivated land quality degradation in the typical black soil region of the Northeast China: a case study of Fujin City[J]. China Land Science, 2024, 38(11): 83 - 93. (in Chinese)

[32] 王子源,方斌,张志成,等.黑龙江省黑土区耕地利用系统脆弱性演变及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2025,46(7):69 - 81.
WANG Ziyuan, FANG Bin, ZHANG Zhicheng, et al. Study on the evolution and influencing factors of the vulnerability of the arable land utilization system in the black soil region of Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(7): 69 - 81. (in Chinese)

[33] 贾朝阳,付强,崔嵩.黑龙江省西部半干旱区生态安全格局构建与优化[J].环境科学,2025,46(8):5180 - 5195.
JIA Zhaoyang, FU Qiang, CUI Song. Construction and optimization of the ecological security pattern in the semi-arid region of western Heilongjiang Province[J]. Environmental Science, 2025,46(8):5180 - 5195. (in Chinese)

[34] 徐秋,雷国平,杨厚翔,等.土壤侵蚀下黑龙江省人地系统适应性研究[J].农业机械学报,2020,51(9):201 - 210.
XU Qiu, LEI Guoping, YANG Houxiang, et al. Adaptability of human-land system under disturbance of soil erosion of Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 201 - 210. (in Chinese)

[35] 张红梅,宋戈.黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素[J].农业机械学报,2021,52(5):239 - 248.
ZHANG Hongmei, SONG Ge. Spatial differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land planting structure in typical counties of Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 239 - 248. (in Chinese)

[36] 周传龙,李莹莹,李丁一,等.陕西省耕地利用强度分化特征及其影响因素研究[J].干旱地区农业研究,2024,42(5):226 - 234,254.
ZHOU Chuanlong, LI Yingying, LI Dingyi, et al. Differentiation characteristics and influencing factors of cultivated land utilization intensity in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 226 - 234,254. (in Chinese)

[37] 林建平,黄坤,邓爱珍,等.耦合耕地综合质量和空间连通性的基本农田划定研究[J].农业机械学报,2024,55(7):221 - 231,251.
LIN Jianping, HUANG Kun, DENG Aizhen, et al. Basic farmland demarcation coupling comprehensive quality and spatial connectivity of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 221 - 231, 251. (in Chinese)

[38] 朱庆莹,何耿毅,陈坤,等.功能与空间形态视角下不同主体功能区耕地利用时空分异特征[J].农业机械学报,2024,55(11):375 - 390.
ZHU Qingying, HE Gengyi, CHEN Kun, et al. Spatial-temporal divergence of cultivated land use in different main functional areas from perspective of functional and spatial form[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 375 - 390. (in Chinese)

[39] 解帅,殷冠羿,娄毅,等.1990—2020 年中国耕地利用的“水旱分异”格局及机制分析[J].中国土地科学,2022,36(6):113 - 124.
XIE Shuai, YIN Guanyi, LOU Yi, et al. Differentiation pattern and driving mechanism of paddy field and dryland of China in 1990—2020[J]. Chinese Journal of Land Science, 2022, 36(6): 113 - 124. (in Chinese)

[40] 金慧芳,史东梅,钟义军,等.红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2019,35(20):84 - 93.
JIN Huifang, SHI Dongmei, ZHONG Yijun, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 84 - 93. (in Chinese)