

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

宋戈, 蔡钊阳, 隋虹均, 苏锐清

(1. 东北大学文法学院土地资源管理系, 沈阳 110169; 2. 辽宁省土地利用与保护研究基地, 沈阳 110169;
3. 辽宁省自然资源厅土地保护与利用重点实验室, 沈阳 110169)

摘要: 耕地退化主要表现为耕地质量退化和耕地生态退化, 二者之间相互反馈对耕地退化影响显著。该研究以下辽河平原典型区域沈阳市为研究区, 运用主客观赋权法、多种回归方法和模糊数据集比较法等, 从质量和生态互馈视角, 构建耕地退化测度体系, 探究耕地退化的时空特征及影响机理, 提出缓解耕地退化的治理对策。结果表明: 1) 研究区发生耕地质量退化的比例为 35.31%, 呈现出“东强西弱”的时空格局。耕地生态退化的比例为 79.10%, 表现出“北强南弱”的时空格局。基于质量和生态互馈的耕地退化比例为 37.80%, 显现出“南北强中间弱”的时空格局。2) 受自然和社会经济因素影响, 耕地退化呈现区域空间的异质性和时间的非平稳性, 在组态中生成不同的组成结构且协同作用于耕地退化, 进而形成了耕地退化的区域性、阶段性和结构性影响机理。3) 实施分级、分区的耕地保护利用与管控体系和综合多要素协同治理保障策略, 有利于缓解耕地退化态势。该研究基于质量和生态互馈视角深化了耕地退化的影响机理, 为耕地退化的精准、高效、协同治理提供政策参考, 在一定程度上能够实现耕地质量、生态环境和抵御外界不利因素能力的同步提升。

关键词: 耕地退化; 生态退化; 耕地质量; 影响机理; 下辽河平原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405027

中图分类号: F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-17-0273-10

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405027 <http://www.tcsae.org>

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(17): 273-282. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405027 <http://www.tcsae.org>

0 引言

耕地退化反映了耕地受到外部扰动时可持续性下降甚至完全丧失的时空过程, 严重威胁着国家粮食安全和耕地可持续利用^[1-2]。耕地退化主要表征为两种类型: 一是耕地生产能力降低的耕地质量退化, 二是外部生态环境恶化的耕地生态退化, 其中耕地质量退化改变了耕作土壤的理化性质, 削弱了耕地的抗逆性, 耕地生态退化增强了外部环境对耕地的扰动, 二者相互反馈对耕地退化影响显著, 进一步加剧了耕地退化的风险^[3]。受气候变化和高强度人类活动的影响, 中国已有 40% 以上的耕地出现了土壤肥力下降、盐碱化、土壤污染、水土流失等不同程度的退化^[4]。中国政府高度重视耕地退化问题, 制定了一系列法规、政策, 如退耕还林还草工程、三北防护林建设、水土保持工程等, 有效提高了耕地质量、改善了耕地生态环境^[5], 但耕地退化态势依旧不容乐观,

亟待解决。从耕地质量退化和耕地生态退化二者相互反馈视角, 探究耕地退化机理和综合治理对策, 能够深入阐明耕地退化的影响机理, 提出综合治理对策, 对缓解耕地退化具有重要的学术价值和实践指导意义, 同时对实现耕地的可持续利用具有重要意义。

目前学术界围绕耕地退化的评价与监测、影响因素和治理对策等方面开展了大量探索, 形成了基本共识, 即耕地退化其本质表现为耕地质量退化和耕地生态退化^[6]。耕地质量退化的研究多以联合国粮农组织提出的《土地评价纲要》《可持续土地利用评价纲要》为基础, 综合考虑耕地土壤的物理、化学及生物特征, 选取反映耕地土壤理化性质、耕地立地条件等相对独立的指标, 构建以土壤条件为核心的耕地质量评价体系, 运用主成分分析法、熵权法、专家打分法等计算因子权重及耕地质量退化程度, 揭示耕地质量退化的时空演变特征^[7-9]; 耕地生态退化的研究已从单因素逐渐发展到多因素评价, 且随着遥感技术的发展, 学界借助土壤流失测算方程 (universal soil loss equation, USLE)、风力侵蚀测算方程 (revised wind erosion equation, RWEQ)、比值植被指数 (relative vegetation index, RVI)、土壤盐渍化测算方程 (normalized difference vegetation index-salinity

收稿日期: 2024-05-07 修订日期: 2024-07-26

基金项目: 辽宁省社会科学规划基金重点建设学科项目 (L23ZD027)

作者简介: 宋戈, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地利用与管理。

Email: songgelaoshi@163.com

index, NDVI-SI)、土壤沙化测算方程(Albedo-NDVI)等多源遥感监测模型,获取了水力侵蚀、风力侵蚀、土壤污染、土壤盐渍化、土壤沙化等表征耕地生态退化的重要指标,运用层次分析法、灰色关联度模型等对其进行耦合,为全面评价与监测耕地生态退化程度奠定了基础^[10-12]。当前学界对耕地退化评价与监测的研究,或者是单独考虑耕地质量退化或者单独考虑耕地生态退化,对二者互馈作用后的耕地退化结果研究尚少,本文作者研究团队前期研究成果表明,对二者进行有机耦合是系统阐明耕地退化时空特征的关键^[7,10]。针对耕地退化影响因素的研究主要聚焦于流域、省域、市域、矿山等尺度,研究发现光照、气温、降水等自然因素和城镇化、环境污染、不合理的耕地利用等人为因素是耕地退化的主要影响因素^[13-15],据此提出相关治理对策。已有成果为本研究奠定了重要基础,但对耕地退化影响因素作用效果的空间异质性、发展阶段的时间非平稳性以及作用路径考虑不足,尚需深入阐明耕地退化的影响机理,并有针对性提出耕地退化治理对策。

鉴于此,本研究以下辽河平原典型区域沈阳市为研究区,采用科学方法,基于质量和生态互馈视角构建耕地退化测度体系,测算2010—2020年研究区耕地质量退化和生态退化互馈情况下耕地退化程度,探索耕地退化影响因素作用效果的空间异质性、发展阶段的非平稳性以及作用路径,系统阐明耕地退化的影响机理,提出缓解耕地退化的治理对策,旨在为下辽河平原乃至全国同类区域退化耕地的精准、高效、协同治理提供科学依据和重要参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

沈阳市位于下辽河平原的中部,土地总面积为12 860 km²,耕地面积占土地总面积的63%,是下辽河平原耕地面积最大的地级市,也是国家重要的商品粮基地,对保障区域粮食安全发挥着重要作用。沈阳市辖2个县、1个县级市和10个市辖区,2022年人均地区生产总值为84 268元,常住人口为915万人,城镇化率为85%,是下辽河平原国土开发强度最大的区域。研究区土壤类型丰富,河网密集,雨热条件较好,种植历史悠久,2022年粮食作物播种面积达54.4万hm²,粮食总产量达393万t。受气候变化和人类活动的影响,研究区耕地退化现象日益凸显,在地理位置、耕地质量和生态环境等方面均体现出下辽河平原的典型性,为此亟需明确研究区耕地退化的影响机理及治理对策。

1.2 数据来源与处理

土地利用数据来源于2010、2020年Google Earth高清影像和中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);2010年土壤数据来源于时空三极环境大数据平台(<https://poles.tpdac.cn/zh-hans/>)提供的面向陆面模拟的中国土壤数据集(2013)^[16],2020年土壤数据来源于国家地球系统科学数据中心土壤分中心([\[geodata.cn/\]\(http://geodata.cn/\)\)提供的中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集\(2010—2018\)^{\[17-18\]};气象数据来源于国家地球系统科学数据中心\(<http://www.geodata.cn/>\)提供的2010年和2020年中国气温、降水、风速数据集;2010年和2020年生态环境数据来源于中国科学院空天信息创新研究院\(\[databank.casearth.cn\]\(http://databank.casearth.cn\)\)提供的研究区6月Landsat地表反射率数据、美国地质勘探局\(<https://lpdaac.usgs.gov/>\)提供的植被净初级生产力数据、国家地球系统科学数据中心\(<http://www.geodata.cn/>\)提供的PM2.5数据;地均GDP、人口密度、夜间灯光等社会经济数据来源于国家青藏高原科学数据中心\(<http://data.tpdac.ac.cn>\)、中国科学院资源环境科学数据中心\(<http://www.resdc.cn>\),《辽宁省统计年鉴》和《沈阳市统计年鉴\(2011—2021\)》。](http://soil.</p></div><div data-bbox=)

研究区2010年和2020年土地利用矢量数据,运用ArcGIS10.8软件依次将沈阳市地类图斑与2010年和2020年Google Earth高清历史影像叠置,通过目视判读对地类图斑进行形状和属性信息的修正获取;2010年和2020年的土壤性状数据,应用MATLAB2017b和ENVI5.3软件提取面向陆面模拟的中国土壤数据集(2013)和中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018)中的土壤有机质含量、酸碱度、全氮含量、全磷含量、全钾含量等相关土壤指标,土层厚度为0~5cm来表征;研究区2010年和2020年的水力侵蚀程度、风力侵蚀程度、土壤盐渍化程度、土壤沙化程度、土壤污染程度、植被覆盖度数据,以2010年和2020年Landsat地表反射率数据、气象数据、土壤数据为基础,借助ArcGIS10.8和ENVI5.3软件对Landsat波段数据进行辐射定标、几何校正、波段组合、影像裁剪、图像增强等处理,采用USLE、RWEQ、RVI、NDVI-SI、Albedo-NDVI等模型^[10]获取;2010年和2020年研究区耕作便利度、灌溉能力和道路通达度,以研究区2010年和2020年土地利用矢量数据为基础,运用欧式距离法分别计算耕地距居民点的欧氏距离、耕地距水源的欧式距离、耕地到公路的欧式距离来表征。利用研究区范围矢量数据对上述数据进行掩膜处理,获得研究区2010和2020年土壤数据、生态环境数据、气象数据和社会经济数据,将上述指标的计算结果均重采样至10m,以保证所有结果均可被提取到所有的耕地图斑中。

2 研究方法

2.1 基于质量和生态互馈的耕地退化测度

2.1.1 耕地退化指标体系构建

本研究充分考虑研究区的地理生态环境现状,通过比较研究期内前后质量和生态水平下降的过程,反映耕地退化的本质特征。选取表征耕地质量退化和耕地生态退化指标的变化量^[7],基于质量和生态互馈视角构建耕地退化测度体系,与评估不同时间点耕地质量状况和耕地生态状况的前后差异相比,能够准确诊断影响耕地退化的敏感性指标,有针对性地提出耕地退化的治理策略。

本研究主要基于土地利用角度来研究耕地退化，鉴于此，耕地质量重点考虑耕地资源利用的禀赋条件，选取土壤有机质、土壤酸碱度、土壤全氮、土壤全磷和土壤全钾的前后变化量作为耕地质量是否退化指标，其中土壤有机质含量、土壤酸碱度能够有效反映耕作土壤的理化性质，土壤全氮含量、土壤全磷含量、土壤全钾含量能够有效反映耕作土壤的养分状况^[19]。在生态环境变化与人类高强度活动影响下，加速了以耕地土壤侵蚀、盐渍化、沙化、污染与生产能力降低为主要表现的耕地生态退化现象^[10,20]，因此本研究选取了水力侵蚀、风力侵蚀、土壤盐渍化、土壤沙化、土壤污染和净初级生产力的前后变化量作为耕地生态退化指标。

2.1.2 耕地退化测度模型

1) 耕地质量退化和耕地生态退化指标的权重确定

主成分分析法是利用降维处理技术将多个变量统计成少数几个综合指标的一种测算方法，被广泛地应用于指标权重的获取。本研究以耕地质量和生态退化指标的空间分布为基础，借助 ArcGIS10.8 软件中的栅格计算器和区域分析功能，计算研究区 2020 年较 2010 年发生耕地质量和生态水平的变化幅度及各耕地图斑退化指标的平均值，并采用极差标准化法将退化指标归并至 [-1,1] 之间以消除各指标间量纲影响；借助 SPSS18.0 软件对各耕地图斑质量和生态指标的退化数据进行主成分分析^[21]，获得各退化指标的旋转后因子载荷、各主成分的方差贡献率以及累积贡献率，按照累计贡献率超过 50% 且特征值大于 1 的原则提取主成分因子，再计算各指标的旋转后因子载荷值与公因子方差和的比值并将其作为每个评价指标的权重，最后将每个评价指标权重与每个主成分的方差贡献率进行加权算出所需要的综合得分值并进行归一化处理，由此得到各退化指标的单一权重（表 1）；利用加权求和法将已测算出的耕地质量退化和生态退化指标权重分别进行求和，诊断研究区耕地质量退化程度和耕地生态退化程度。计算式为

表 1 耕地退化测度体系

Table 1 Measurement system of cultivated land degradation

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	单一权重 Single weight	互馈权重 Mutual feedback weight
耕地退化 Cultivated land degradation	质量	土壤有机质含量变化量	0.29	0.69
		土壤酸碱度隶属函数变化量	0.11	
		土壤全氮含量变化量	0.29	
		土壤全磷含量变化量	0.15	
		土壤全钾含量变化量	0.16	
	生态	水力侵蚀变化量	0.06	0.31
		风力侵蚀变化量	0.03	
		土壤盐渍化变化量	0.29	
		土壤沙化变化量	0.12	
		土壤污染变化量	0.31	
		净初级生产力变化量	0.20	

注：土壤酸碱度隶属函数，依据《全国耕地质量等级评级指标体系》东北地区土壤酸碱度隶属函数计算所得。

Note: The membership function of soil pH is calculated according to the membership function of soil pH in Northeast China of the National Cultivated Land Quality Rating Index System.

$$D_j = \sum_{k=1}^n D_k U_k \quad (1)$$

式中 D_j 为耕地质量退化度和耕地生态退化度； D_k 为各项退化指标权重； U_k 为各项退化指标标准化后的值； n 为评价指标数。

2) 耕地质量退化和耕地生态退化互馈的权重确定

客观赋权法（criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC）可以综合考虑指标间的对比强度和冲突性，能够全方位分析指标间的特征关系，突出指标间的协调性，提升权重测算的准确性^[22]。本研究以耕地质量退化度和耕地生态退化度为基础，采用 CRITIC 模型测算二者互馈作用的权重（表 1），评估基于质量和生态互馈的耕地退化程度。计算式为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}} \quad (2)$$

$$R_j = \sum_{j=1}^n (1 - r_{nj}) \quad (3)$$

$$C_j = S_j R_j \quad (4)$$

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (5)$$

$$D = \sum_{j=1}^n D_j W_j \quad (6)$$

式中 S_j 为第 j 个指标的标准差； R_j 为第 j 个指标与其他指标的冲突性； C_j 为信息量； W_j 为耕地质量退化度和耕地生态退化度的互馈作用权重； m 为评价样本 i 的数量， n 为评价指标 j 的数量； x_{ij} 为第 i 个评价样本第 j 项指标的值， \bar{x}_j 为第 j 项指标的平均值， r_{nj} 为 n 个评价指标 j 之间各自的相关系数； D 为基于质量和生态互馈的耕地退化程度，即耕地退化度。

2.2 基于质量和生态互馈的耕地退化影响机理模型构建

2.2.1 关键影响因素识别

识别基于质量和生态互馈的耕地退化的关键影响因素是阐明耕地退化影响机理的重要基础。本研究从以下两个方面确定耕地退化的关键影响因素：一是结合研究区地理生态环境和社会经济发展水平，根据指标选取的科学性、全面性、可操作性和数据可获得性，从自然条件和社会经济两个方面选择了气温（年均气温）、降水（年降水量）、经济水平（地均 GDP）、城镇化水平（夜间灯光）、人口规模（人口密度）、耕作便利度（耕地距居民点的欧氏距离）、灌溉能力（耕地距水源的欧式距离）、植被覆盖度（NDVI）、环境污染（PM2.5）、道路通达度（耕地到公路的欧式距离）共 10 个指标的变化量^[13-15]，构建耕地退化的影响因素指标体系。考虑到影响机理模型运行的需要，借助 ArcGIS 平台为研究区耕地图斑构建 3 km×3 km 的地理网格，运用栅格计算器功能计算研究区内各变量的均值，并将所有变量进行 Z-score 标准化处理以克服变量间量纲的影响。二是运用探

索性回归模型,从构建的耕地退化影响因素指标体系中识别关键影响因素。探索性回归分析模型能够充分考虑解释变量的冗余性、完整性、显著性、偏差、性能以及空间相关性,对解释变量所有组合进行评估,筛选出最优的回归模型^[23],对本研究识别耕地退化的关键影响因素具有较强的适用性。

2.2.2 耕地退化的影响机理模型构建

地理加权回归模型是在传统最小二乘回归模型基础上引入空间关系,可以定量表达影响因素作用效果的空间非平稳性^[24]。本研究以耕地退化度(D)为被解释变量,以关键影响因素为解释变量,利用地理加权回归模型探究关键影响因素在不同区域对耕地退化度的空间作用效果和方向,阐明基于质量和生态互馈的耕地退化区域性影响机理。计算式为

$$Y_i = \beta_0(m_i, n_i) + \sum_{f=1}^F \beta_f(m_i, n_i) X_{if} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中 Y_i 为第 i 个评价样本耕地退化度 (D); X_{if} 为第 i 个评价样本第 f 个关键影响因素值; β_0 为假定常数; β_f 为第 f 个关键影响因素的回归系数; i 为评价样本; (m_i, n_i) 为第 i 个评价样本的重心坐标; F 为关键影响因素个数, ε_i 服从正态分布。

分位数回归模型可用于测算多个分位点上解释变量对被解释变量的影响趋势及变化情况^[25]。本研究采用分位数回归模型,探究关键影响因素对耕地退化不同分位点的影响程度,以此表征不同发展阶段耕地退化影响因素的时间非平稳性作用效果,揭示基于质量和生态互馈的耕地退化阶段性影响机理。计算式为

$$Q_{\tau}(\tau|\alpha_i, \varepsilon_i, X_{if}) = \alpha_i + \sum_{f=1}^F \beta_f X_{if} + \varepsilon_i \quad (8)$$

式中 τ 为分位点,即耕地退化的不同阶段; Q_{τ} 为不同分

位点第 i 个评价样本的耕地退化度 (D); α_i 为截距项; β_f 为第 f 个关键影响因素的回归系数; X_{if} 为第 i 个评价样本第 f 个关键影响因素值; ε_i 为随机误差项。

模糊数据集比较法可以探索复杂的因果关系和多样的因果路径,弥补了传统定量研究局限于独立变量与结果间简单对称的线性关系^[24]。本研究运用模糊数据集比较法对耕地退化的关键影响因素进行组态分析,探索关键影响因素是否存在必要性和充分性关系,明确关键影响因素的组合路径,揭示基于质量和生态互馈的耕地退化结构性影响机理。计算式为

$$\text{Consistency}(X_i \leq Y_i) = \sum [\min(X_i, Y_i)] / \sum X_i \quad (9)$$

$$\text{Coverage}(X_i \leq Y_i) = \sum [\min(X_i, Y_i)] / \sum Y_i \quad (10)$$

式中 Consistency 为一致性; Coverage 为覆盖度; Y 为耕地退化度 (D); X 为关键影响因素。

3 结果与分析

3.1 基于质量和生态互馈的耕地退化时空特征

研究区 2010—2020 年耕地质量退化的总面积为 2805.21 km²,占区域耕地总面积的 35.31%,主要分布在研究区的东部和北部,其中轻度退化总面积为 807.89 km²,中度退化总面积为 1217.99 km²,重度退化总面积为 779.33 km²,总体呈现出东部高、西部低的空间格局(图 1a; 图 2a)。耕地生态退化的总面积高达 6284.10 km²,占区域耕地总面积的 79.10%,主要分布在研究区的北部和西部,其中轻度退化总面积为 1320.07 km²,中度退化总面积为 2399.22 km²,重度退化总面积为 2564.81 km²,表现出由南向北逐渐增强的空间格局(图 1b; 图 2b)。

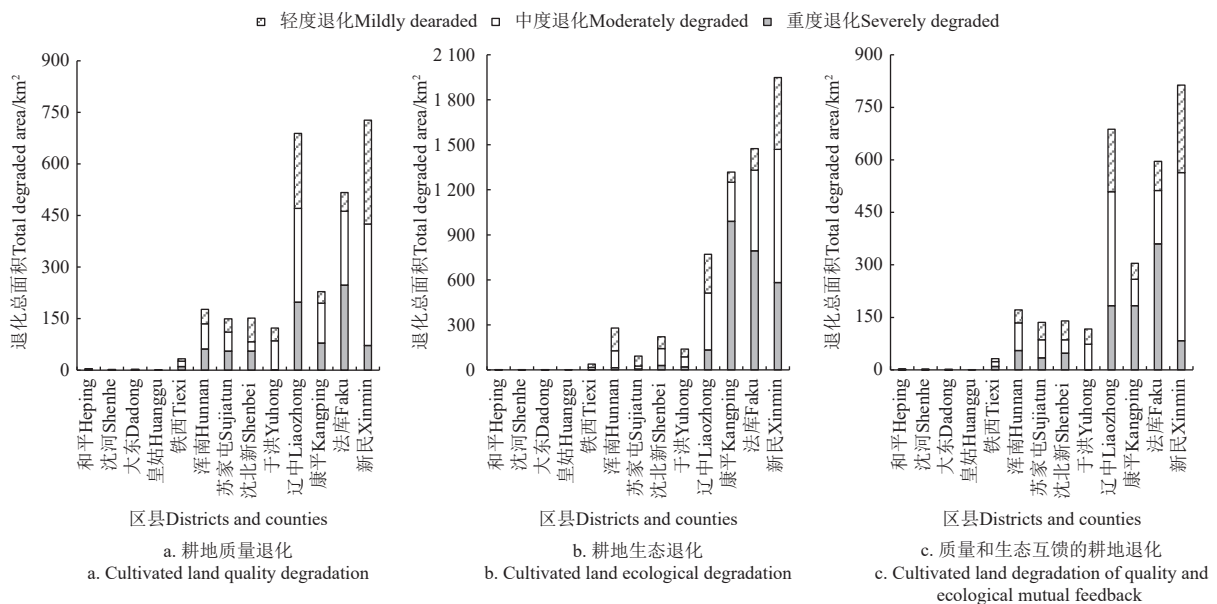


图 1 2010—2020 年研究区耕地退化测度结果

Fig.1 Calculation results of cultivated land degradation in study area from 2010 to 2020

基于质量和生态互馈的耕地退化总面积为 3002.52 km²，占区域耕地总面积的 37.80%，主要分布在研究区的南部和辽河冲击平原地区，其他区域多以团块状分布（图 1c；图 2c），其中新民市、辽中区、法库县退化发生比例较高，退化总面积分别为 813.25、687.14、595.43 km²，三者退化总面积之和占区域退化总面积的 69.80%，其他区县耕地退化发生比例相对较低。基于质量和生态互馈的耕地退化强度总体显现出南部和北部高，中部低的时空分布特征，其中轻度退化和中度退化总面积分别为 752.45 km² 和 1293.14 km²，新民市发生比例最高；重度退化总面积为 956.93 km²，法库县发生比例最高。

研究结果表明，近 10 年研究区耕地退化态势严峻，展现出明显的空间分异格局（图 2），北部地区是耕地退化的重点区域。探究其原因主要在于研究区为促进耕地持续集约利用，常通过投入较高的化肥、农药、地膜等物质以促进粮食增产，其背后是耕地有机质和养分含量的下降^[26]，同时受全球气候变暖的影响，微生物对土壤有机质的分解速率加快，导致土壤水分的流失，破坏了土壤结构和质量，加剧了耕地质量退化的进程。尽管研究区近年来实施了土地综合整治、高标准农田建设等工程，逐步完善了农田灌溉、排水、农田防护林等基础设施，促进了区域耕地生态系统稳定性的提升，但受气温、光照等自然因素和城镇化、工业化、耕作条件等社会经济因素的影响，研究区发生土壤盐渍化、水土流失、土壤侵蚀的概率依旧不容乐观，导致大量耕地发生生态退化。耕地质量的退化降低了耕地的抗逆性，耕地生态的退化提高了耕地外部环境的扰动，二者之间相互反馈作用，最终加剧了耕地退化的进程，尤其研究区的北部最为明显。不难发现，研究区耕地退化的测度结果与现实耕地利用状态相吻合，也进一步证明了本研究基于质量和生态互馈视角测算的耕地退化诊断结果的科学性。

3.2 基于质量和生态互馈的耕地退化影响机理

探索性回归分析结果显示，气温、植被覆盖度、城镇化、灌溉能力和环境污染对研究区耕地退化存在极显著影响（ $P < 0.01$ ），且不存在多重共线性（VIF 均小于 3），表明气温、植被覆盖度、城镇化、灌溉能力和环境污染是导致研究区发生耕地退化的关键自然条件和社会经济因素，是探索基于质量和生态互馈的耕地退化影响机理的前提和基础。

3.2.1 耕地退化的区域性影响机理

气温、植被覆盖度、城镇化、灌溉能力和环境污染 5 个关键自然条件和社会经济影响因素在不同区域对基于质量和生态互馈的耕地退化的作用效果和方向不同，呈现出明显的区域空间异质性，表明耕地退化的影响机理具有区域性（图 3）。

1) 自然条件

气温变化对耕地退化的作用效果由东向西逐渐增强，在大部分区域呈现出较为明显的正向促进作用，意味着该区域气温的升高促进了耕地退化；在小部分区域呈现

出负向抑制作用，意味着该区域气温升高抑制了耕地退化（图 3a）。气温升高一方面会加快土壤有机质分解和水分蒸发，影响土壤中微生物的活性，导致耕地质量发生下降，另一方面会导致极端天气发生的风险增加，这些极端天气会加剧土壤受到风蚀和水蚀的程度，降低耕地生产能力，加速耕地生态退化的过程^[27]。植被覆盖度在绝大部分区域对耕地退化具有负向抑制作用，这意味着该区域植被覆盖度的增加提高了耕作土壤的保持能力，降低了风蚀发生的风险，阻控了耕地质量退化和生态退化；在小部分区域植被覆盖度对耕地退化具有正向促进作用，这意味着该区域植被覆盖度的提高增加了耕作强度，促进了耕地土壤的扰动，造成了耕地退化（图 3b）。植被覆盖度通常与耕地退化呈现出负相关性，即植被覆盖度越高，地表有较多的植物可以进行光合作用，提供有机质，保持土壤水分，防止水土流失，在一定程度上减缓耕地退化；植被覆盖度过低时，土壤暴露于直接日照和降雨冲击下，易发生侵蚀和退化，降低土壤的保水能力和肥力，加剧耕地退化^[13]。

2) 社会经济因素

城镇化变化对耕地退化具有显著的正向促进作用，特别在研究区的西北和西南地区；在城镇化发展水平较高的东部地区具有负向抑制作用，这意味着具备充足的资金和技术能够提高耕地的抗逆能力和耐受性以缓解耕地退化^[28]（图 3c）。城镇化发展的过程中所产生的土壤、水和空气污染等会恶化耕地环境，增加耕地利用的压力和强度，降低耕地质量和生态系统服务功能，还会导致人口、水资源、能源等进行重分配，使得耕地生产力水平和耕地保护工作发生变化，从而促进或抑制耕地退化。灌溉能力变化对耕地退化的作用效果呈现出由中间向两端逐渐减弱的空间格局，中部地区位于下辽河的两侧，具备充足的水源满足耕地生产，进一步提升灌溉能力，易导致耕地质量退化和生态退化；南部和北部地区水源较为缺乏，适量提升灌溉能力可以缓解土壤盐渍化、干旱化等问题以抑制耕地退化（图 3d）。适当和高效的灌溉能够维持土壤结构，提高土壤肥力，防止土壤干裂和风蚀，减轻盐碱化进程，有助于提升耕地质量，滴灌、微灌等高效灌溉技术可以促进土壤水分和营养的恢复，有利于生态修复^[29]；不当的灌溉，尤其是过度灌溉，易导致土壤水分过剩，引发水渍化、盐碱化、土壤结构破坏等问题，导致耕地退化。环境污染变化会增加耕地退化的风险，尤其在城镇化和社会经济发展水平相对较高且更易产生环境污染的研究区南部和东部区域；研究区西部区域城镇化和社会经济发展水平相对较低，耕地受环境污染影响较轻，对耕地退化具有一定的抑制作用（图 3e）。城镇化和社会经济发展过程中所产生废水、废物、废气通过不当处理后排放进入耕地，改变土壤的理化性质，影响土壤的肥力和结构，干扰土壤的微生物活动和营养循环，削弱生态系统的稳定性和恢复力，加剧耕地退化的速度和程度^[30]。

3.2.2 耕地退化的阶段性影响机理

关键自然条件和社会经济影响因素在耕地退化的不同发展阶段对基于质量和生态互馈的耕地退化的影响呈现出时间非平稳性,揭示了耕地退化的影响机理具有明显的阶段性(表2)。

气温在不同阶段对耕地退化的影响不显著,主要原因在于气温变化是一个较为漫长的过程,短时间内对耕地退化的作用效果不明显;植被覆盖度对耕地退化的作用效果在 Q50~Q90 阶段显著,意味着植被覆

盖度在中度和重度退化期对耕地退化的抑制作用更强;城镇化对耕地退化的作用效果在 Q10~Q40 阶段显著,表明城镇化在轻度和中度退化期对耕地退化的促进作用逐渐减弱;灌溉能力在耕地退化的整个阶段均发挥着显著的负向抑制作用,随着耕地退化进程的演变作用效果呈现出先增强后减弱的变化趋势;环境污染在 Q30~Q90 阶段对耕地退化的抑制作用效果展现出逐渐减弱的态势,可以看出随着耕地退化进程的演变环境污染的促进作用逐渐增强。

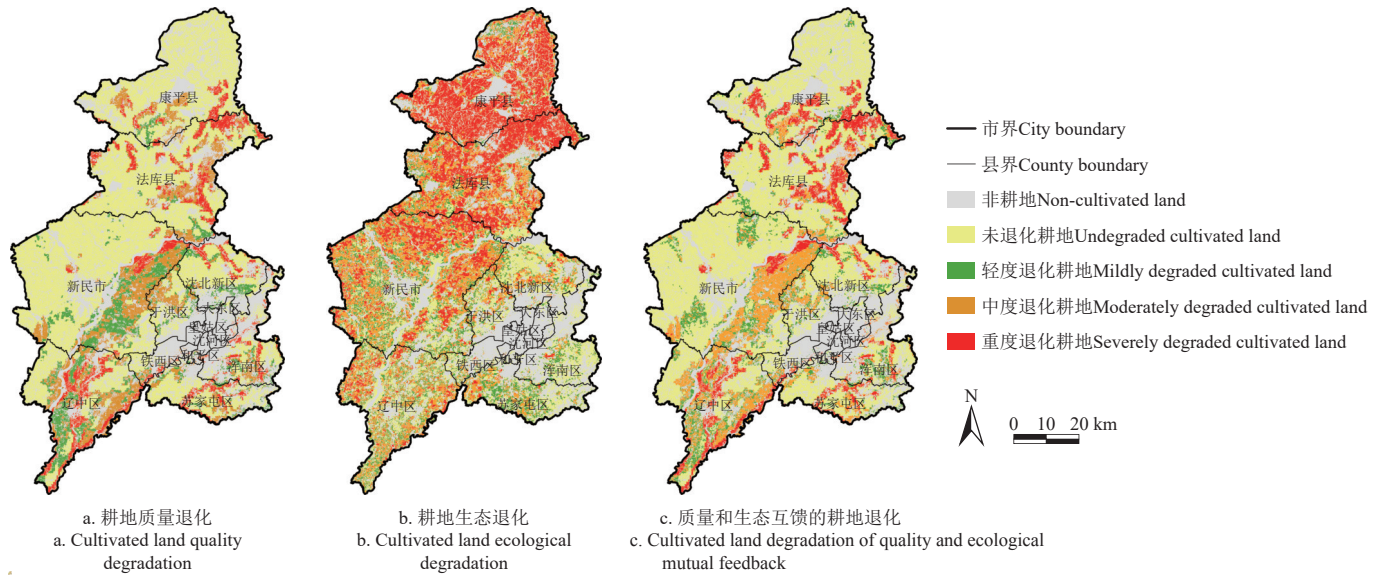


图2 2010—2020年研究区耕地退化的空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of cultivated land degradation in study area from 2010 to 2020

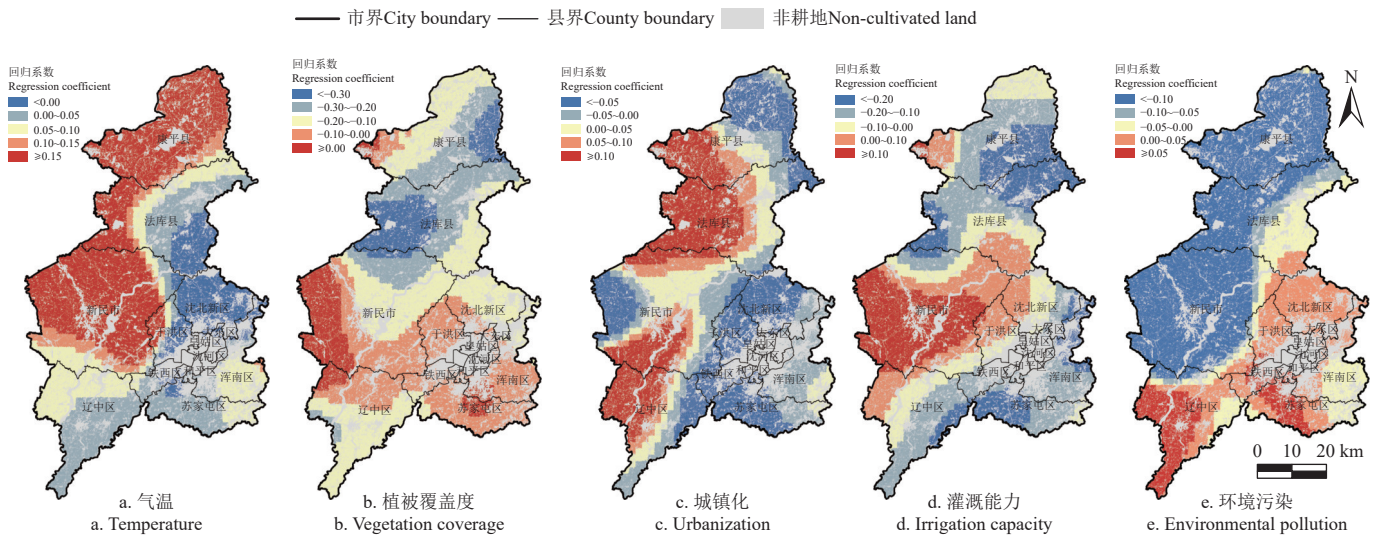


图3 2010—2020年研究区耕地退化影响因素的估计参数及作用效果

Fig.3 Estimated parameters and effects of influencing factors of cultivated land degradation in study area from 2010 to 2020

3.2.3 耕地退化的结构性影响机理

关键自然条件和社会经济影响因素的组态分析结果揭示了基于质量和生态互馈的耕地退化的影响机理具有明显的结构性(表3)。组态的必要性检验结果表明,各关键影响因素的一致性均小于0.9,意味着各关键影响因素不能单独成为耕地退化产生的必要条件,即耕地退化的产生是多种关键影响因素协同作用的结果,需进行

充分性检验进一步探索耕地退化影响机理的多重作用条件的组态路径。参考已有研究对复杂解、中间解和简约解理解的建议^[24],选用中间解的组态构型结果进行组态的充分性分析。检验结果表明(表3),两种条件组合总体解的一致性为0.884,覆盖度为0.425。

其中,构型1的一致性为0.883,原始覆盖度为0.373,气温和城镇化属于核心条件,植被覆盖度和环境污染属

于辅助条件；构型 2 的一致性为 0.896，原始覆盖度为 0.377，气温和城镇化属于核心条件，植被覆盖度和灌溉能力属于辅助条件。组态构型 2 与构型 1 相比，构型 2 的解释能力高于构型 1，解释力更强，它们均可被视为影响耕地退化的充分条件组成结构。根据组态理论化过程，从上

述两种组态的核心条件及其辅助条件的组成结构可以看出，两种组态构型中气温和城镇化因子较突出，需分别辅以植被覆盖度、环境污染、灌溉能力条件因子，即多个关键影响因素对耕地退化的作用存在不同的组成结构，多个因素在不同的组成结构中协同作用导致了耕地退化。

表 2 2010—2020 年研究区耕地退化影响因素的分位数回归结果

Table 2 Quantile regression results of influencing factors of cultivated land degradation in study area from 2010 to 2020

关键影响因素 Key influencing factors		轻度退化期 Mild degradation			中度退化期 Moderate degradation			重度退化期 Severe degradation		
		Q 10	Q 20	Q 30	Q 40	Q 50	Q 60	Q 70	Q 80	Q 90
		自然条件 Natural Conditions	气温	0.121 (0.41)	0.128 (0.13)	0.127 (0.12)	0.165 (0.15)	0.128 (0.13)	0.115 (0.14)	0.081 (0.12)
	植被覆盖度	0.016 (0.48)	-0.017 (-0.29)	-0.068 (-0.76)	-0.052 (-0.97)	-0.068* (-1.67)	-0.107*** (-3.29)	-0.121*** (-4.96)	-0.156*** (-8.24)	-0.142*** (-5.91)
社会经济因素 Social economy factors	城镇化	0.230*** (10.16)	0.236*** (4.32)	0.160*** (3.98)	0.087** (2.20)	0.041 (1.16)	0.024 (0.67)	-0.004 (-0.12)	-0.034 (-1.10)	-0.017 (-0.77)
	灌溉能力	-0.149*** (-4.93)	-0.212*** (-4.28)	-0.215*** (-4.18)	-0.143*** (-2.74)	-0.082** (-2.14)	-0.073* (-1.68)	-0.054* (-1.70)	-0.060** (-2.56)	-0.092*** (-3.99)
	环境污染	-0.088 (-1.45)	-0.132 (-1.31)	-0.295*** (-3.46)	-0.215*** (-2.88)	-0.178*** (-3.63)	-0.121*** (-3.02)	-0.079*** (-3.01)	-0.063*** (-3.89)	-0.064*** (-2.73)

注：Q10~Q90 分别代表不同分位数水平；括号前和括号内数字分别为回归系数和 *t* 值；**P*<0.1，***P*<0.05，****P*<0.01。

Note: Q10-Q90 represent different quantile levels; The numbers in front and parentheses of the brackets are regression coefficients and *t*-value; **P*<0.1, ***P*<0.05, ****P*<0.01.

表 3 2010—2020 年研究区耕地退化影响因素的组态分析结果

Table 3 Results of configuration analysis of influencing factors of cultivated land degradation in study area from 2010 to 2020

关键影响因素 Key influencing factors		必要性检验结果 Necessity test result		充分性检验结果 Adequacy test results	
		一致性 Consistency	覆盖度 Coverage	构型 1 Config1	构型 2 Config2
		自然条件 Natural conditions	气温	0.775(0.527)	0.738(0.559)
	植被覆盖度	0.626(0.656)	0.621(0.666)	☆	☆
社会经济因素 Social economy factors	城镇化	0.664(0.656)	0.707(0.622)	★	★
	灌溉能力	0.648(0.671)	0.645(0.679)	—	☆
	环境污染	0.606(0.683)	0.602(0.693)	☆	—

注：括号前和括号中的数值分别表示原始情形和否定情形时的必要性检验结果；★表示核心条件出现，☆表示辅助条件出现，—表示条件可有可无。

Note: The values in front and parentheses of the brackets represent the necessity test result of the original situation and negative case, respectively; ★ indicates that the core condition occurs, ☆ indicates that the auxiliary condition occurs, and — indicates that the condition is optional.

总之，耕地退化受自然条件和社会经济因素的共同影响，在不同区域对耕地退化的作用效果均呈现出空间异质性，在不同发展阶段对耕地退化的作用效果显现出时间非平稳性，在组态中生成不同的组成结构协同作用于耕地退化，共同形成了耕地退化的区域性、阶段性和结构性影响机理。

3.3 基于质量和生态互馈的耕地退化治理对策

为缓解下辽河平原耕地退化态势，本研究结合研究区基于质量和生态互馈的耕地退化的时空分异特征及区域性、阶段性和结构性影响机理，提出以下耕地退化治理对策。

第一，制定耕地分区管控措施。研究结果显示，自然条件和社会经济因素在不同区域对耕地退化的作用效果呈现出显著的空间异质性，因此本研究结合耕地退化的区域性影响机理，采用城区、近郊区、远郊区进行分区，统计影响因素空间作用综合效果，以此制定耕地退化分区治理措施。城区在快速的城镇化发展过程中，需结合耕地资源特点、水资源分布和供需状况、农业发展需求，合理规划农作物种植结构，加强农田水利基础设施的维护和改进，提高农业生产效率；在耕地与非耕地

之间设立缓冲带，例如搭建围墙、植被、生态走廊等，减少城市扩展对耕地的压力；加大废水、废气、废物的处置力度，减轻污染物对耕地系统的破坏。近郊区需严格控制耕地和永久基本农田调整，稳定农业生产空间；引入现代化节水灌溉技术，完善农业水资源监测和管理体系，优化农业灌溉布局，提高水资源的利用效率；应用先进技术提高植被成活率和增长速度，增加植被覆盖度，注重乔木、灌木和草本植物的结合，形成多层次的植被结构，提高土壤生物多样性，增强土壤保护和生态系统的稳定性。远郊区需加强农田的管理和维护，种植耐热作物品种，加强政策、资金、技术支持改善耕地生产环境，减轻气温变化对耕地退化的影响；制定相关优惠政策，鼓励耕地退化区域采取人工种植树木、草本植物等手段以增加植被覆盖度，促进耕地生态系统的修复；建立耕地利用与保护奖惩机制，如耕地恢复费用、减产补偿、保护奖金等，降低人类活动对耕地退化的扰动。

第二，建立耕地分级保护与利用机制。研究发现，研究区北部的耕地退化最为严重，东南部和西部耕地退化程度次之，关键影响因素在不同发展阶段对耕地退化的作用效果显现出时间非平稳性，因此结合不同区域耕地退化程度及阶段性影响机理采取有针对性的治理措施极其重要。在重度退化耕地区域以“人工修复+污染治理”为主，可运用翻动土壤法混合表层与深层土壤的物理手段、添加还原剂将重金属离子还原成低毒或无毒物质的化学手段、加入有益微生物分解土壤中污染物的生物手段等方法对发生耕地退化的土壤进行修复，改善土壤结构和性质，增加植被覆盖度，提升耕地质量；采取源头控制、过程阻断、末端治理相结合的方式构建耕地生态污染治理路径，全面减轻污染物对耕地生态退化的影响。在中度退化耕地区域以“自然修复+污染防控”为主，可将易腐垃圾、农作物秸秆、人畜粪便等有机废弃物通过静态堆沤处理后科学还田利用，增加土壤有机质，提升土壤肥力；建立高标准农田绿色屏障，完善水库、灌溉泵站、田间道路等农田基础设施，种植防风林、护田林

等,推动水土保持工程项目实施,防止风力侵蚀和水力侵蚀对耕地生态系统的破坏。在轻度退化耕地区域以“质量提升+环境改善”为主,可适当推动城镇化发展以获得资金和技术,完善耕地水资源利用设施,促进土壤水分和营养恢复,提升耕地质量;健全与农业生产相关的法律法规,确保农业生产活动有法可依,加强农业投入品(如农药、添加剂等)源头治理,制定相关政策,鼓励和支持农民采用清洁生产技术,促进农业生产更加环保、高效,改善耕地生态环境。

第三,实施多要素协同治理保障策略。制定耕地退化治理方案时应与耕地保护、生态修复、农业可持续发展等国家政策相结合,科学合理利用和保护区域耕地和自然资源,加强农业、发改委、林业、水利、环保、国土资源等部门之间的信息共享与协同合作,综合考虑自然条件和社会经济因素对耕地退化的影响,构建多要素协同治理模式,降低耕地退化的风险。强化地方政府在耕地管理和恢复工作中的责任,提供必要的资金和政策支持,完善农业基础设施,增强耕地抵御自然灾害和社会经济活动的的能力;充分发挥耕地经营主体的主观能动性,大力推进耕地退化治理的宣传与教育,提高耕地保护的意愿,降低耕地退化的风险;鼓励社区成立耕地保护与管理小组,定期组织开展农业技术培训、管理知识培训等活动,积极普及耕地保护的重要性、耕地退化的原因及治理方法,推动退化耕地的治理和恢复;鼓励科研院所加强土壤修复技术、生态农业技术、节水灌溉技术等耕地保护技术以及耕地质量提升与退化阻控技术的研发,形成“地方政府—耕地经营主体—社区—科研院所”多元主体协同治理的保障策略,加强耕地退化的治理。此外,还需借助卫星、无人机遥感等先进的技术手段,运用“天—空—地”立体网络监测平台,定期对耕地质量和生态的基本状态、耕地退化治理效果等进行监测,为耕地退化协同治理及时提供有效的信息。

4 讨论

下辽河平原作为国家重要的粮食主产区和商品粮调出地,深入探究耕地退化的影响机理和治理对策有助于保障粮食安全和推动耕地资源可持续利用。本研究以下辽河平原典型区域沈阳市为研究区,基于质量和生态互馈视角改进了耕地退化测度体系^[7,10],研究区耕地退化测算结果与实际耕地利用情况相吻合,证明本研究的耕地退化测度方法具有一定的科学性,能够正确反映耕地退化的时空特征,为系统、深入探索耕地退化的演变趋势提供参考。耕地退化关键影响因素的识别及影响机理的探讨,弥补了耕地退化影响因素作用效果的空间异质性、发展阶段的时间非平稳性以及作用路径等方面研究的不足^[13],阐明了耕地质量退化和生态退化互馈作用下耕地退化的区域性、阶段性和结构性影响机理,为深层次揭示耕地退化的影响机理提供了理论依据。分级、分区的耕地保护利用与管控措施和多要素协同治理的保障策略,有利于退化耕地的精准、高效、协同治理,丰富和完善了退化耕地的治理对策^[14-15],在一定程度上能够实现耕地质量、生态环境和抵御外界不利因素能力的同步提升。

总体而言,本研究侧重探讨基于质量和生态互馈视角下耕地退化的测度,重点关注耕地退化区域性、阶段性和结构性影响机理及治理对策。但由于耕地系统变化的复杂性,耕地退化的测度体系仍有待进一步细化,尤其针对耕地质量退化的测度体系,本研究从土地利用角度出发,重点考虑耕地资源利用的禀赋条件,选取了表征耕作土壤性状的土壤理化性质、养分元素含量等指标测度耕地质量退化状况,但耕地质量还与自然环境、外部利用条件等密切相关,未来有必要与土壤学、社会学等多学科开展交叉研究,以此更全面评估耕地质量退化。鉴于土壤有机质、土壤养分元素含量在耕作活动的不同时期变化很大,本研究选择了2010年和2020年两个相对静态的时间点,采用不同退化指标的变化量作为评估项,准确诊断了影响耕地退化的敏感性指标,深化了耕地退化的测度方法,但由于当前数据资源的可获得性,导致本研究对不同时期退化指标的变化、初始条件及突变阈值考虑不足。同时,由于本研究使用的数据涉及土地利用数据、土壤数据、生态环境数据、气象数据和社会经济数据等,当前条件难以全面获取更长时间序列的上述数据,未能深入揭示更长时间内耕地退化的演变趋势。因此未来的研究需综合考虑不同时期耕地退化指标的变化量、初始条件与突变阈值,深入开展长时间序列的耕地退化时空演变规律及影响机理研究,旨在提出更加系统、全面的耕地退化治理对策,为实现下辽河平原退化耕地的精准、高效、协同治理提供理论和实践支撑,也为同类地区耕地退化治理提供重要依据。

5 结论

本研究以下辽河平原典型区域沈阳市为研究区,从质量和生态互馈视角,构建耕地退化测度体系,运用主客观赋权法、多种回归方法和模糊数据集比较法等,阐明2010—2020年耕地退化的时空特征及影响机理,提出缓解耕地退化的治理对策。研究主要结论如下:

1) 研究区发生耕地质量退化的比例为35.31%,呈现出东部高、西部低的时空格局;耕地生态退化的比例为79.10%,表现出由南向北逐渐增强的时空格局;基于质量和生态互馈的耕地退化比例为37.80%,总体显现出南部和北部高,中部低的时空格局。

2) 气温、城镇化、灌溉能力、植被覆盖度、环境污染是导致研究区耕地退化的关键自然条件和社会经济因素,在不同区域、发展阶段对耕地退化的作用效果分别呈现出空间异质性、非平稳性,在组态中生成不同的组成结构协同作用于耕地退化,共同形成了耕地退化的区域性、阶段性和结构性影响机理。

3) 研究区可依据不同区域耕地退化强度、影响因素的作用效果及多因素组合的作用路径,实施分级、分区的耕地保护利用与管控措施和综合多要素协同治理保障策略,完善耕地退化治理保障体系,缓解耕地退化态势。

【参考文献】

- [1] 周伟,石吉金,范振林.基于粮食安全和生态安全的耕地

- 生态保护研究[J]. 中国土地科学, 2023, 37(7): 125-134.
- ZHOU Wei, SHI Jijin, FAN Zhenlin. Research on ecological protection of cultivated land based on food security and ecological security[J]. *China Land Science*, 2023, 37(7): 125-134. (in Chinese with English abstract)
- [2] ZHOU Y, LI X H, LIU Y S. Cultivated land protection and rational use in China[J]. *Land Use Policy*, 2021, 106: 105454.
- [3] FENG S Y, ZHAO W W, ZHANG T Y, et al. Land degradation neutrality: A review of progress and perspectives[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 14: 109530.
- [4] 马瑞明, 郇文聚. 耕地退化敲响粮食安全警钟[N]. 中国科学报, 2019-12-3 (5).
- [5] 金晓斌, 梁鑫源, 韩博, 等. 面向中国式现代化的耕地保护学理解析与地理学支撑框架[J]. *经济地理*, 2022, 42(11): 142-150.
- JIN Xiaobin, LIANG Xinyuan, HAN Bo, et al. Theoretical analysis and geographical support framework of cultivated land protection for Chinese-style modernization[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(11): 142-150. (in Chinese with English abstract)
- [6] BEESLEY K B, RAMSEY D. Agricultural land preservation[J]. *International Encyclopedia of Human Geography*, 2009, 25(6): 65-69.
- [7] 隋虹均, 宋戈, 刘馨蕊. 遗传和变异视角下东北黑土区典型地域耕地质量退化时空分异——以富锦市为例[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(10): 53-62.
- SUI Hongjun, SONG Ge, LIU Xinrui. Spatial and temporal differentiation of cultivated land quality degradation in a typical black soil region of northeast China from the perspective of genetics and variation: A case study in fujin city[J]. *China Land Science*, 2022, 36(10): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- [8] 钱凤魁, 项子璇, 王贺兴, 等. 基于最小数据集与 LESA 体系的县域耕地质量评价[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 239-248.
- QIAN Fengkui, XIANG Zixuan, WANG Hexing, et al. Evaluating cultivated land quality in county territory using the minimum data set, land evaluation and site assessment (LESA)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(8): 239-248. (in Chinese with English abstract)
- [9] LIU L M, ZHOU D, CHANG X, et al. A new grading system for evaluating China's cultivated land quality[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(12): 1482-1501.
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 吕文宝, 徐占军, 杨丽琪, 等. 基于多源遥感数据与胁迫视角下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.
- LYU Wenbao, XU Zhanjun, YANG Liqi, et al. Ecosystem stability evaluation of cultivated land based on multi-source remote sensing data and stress perspective—the Fenhe River Basin as an example[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44 (5): 2937-2947. (in Chinese with English abstract)
- [12] SUI H J, SONG G, LIU W Y, et al. Spatiotemporal variation of cultivated land ecosystem stability in typical regions of Lower Liaohe Plain China based on stress-buffer-response[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 858: 160213.
- [13] 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 with English abstract)
- [14] YU Z Y, DENG X Z. Assessment of land degradation in the North China Plain driven by food security goals[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 183: 106766.
- [15] 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 Sihang, 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 with English abstract)
- [16] 上官微, 戴永久. 面向陆面模拟的中国土壤数据集. 时空三极环境大数据平台[EB/OL], 2014, <https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/11573187-fd64-47b1-81a6-0c7c224112a0/>.
- SHANGGUAN Wei, DAI Yongjiu. A China dataset of soil properties for land surface modeling. A Big Earth Data Platform for Three Poles[EB/OL], 2014, <https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/11573187-fd64-47b1-81a6-0c7c224112a0/>. (in Chinese with English abstract)
- [17] LIU F, WU H, ZHAO Y, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340.
- [18] LIU F, ZHANG G L, SONG X D, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114061.
- [19] 孙晓兵, 蔡为民, 孔祥斌, 等. 基于多元主体协同的县域耕地质量调控模式与整治时序分区[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(21): 232-245.
- SUN Xiaobing, CAI Weimin, KONG Xiangbin, et al. Quality regulation pattern and consolidation time zone of county-level cultivated land based on multi agent collaboration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(21): 232-245. (in Chinese with English abstract)
- [20] 程鹏, 柳可, 张杨, 等. 碳排放约束下耕地利用推动粮食生产的逻辑关联、现实矛盾与路径优化[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 246-254.
- CHENG Peng, LIU Ke, ZHANG Yang, et al. Logical correlation, realistic contradictions and path optimization for promoting grain production through cultivated land utilization under carbon emission constraints[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(12): 246-254. (in Chinese with English abstract)
- [21] MIKHA M M, GREEN T R, UNTIEDT T J, et al. Land management affects soil structural stability: Multi-index principal component analyses of treatment interactions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 235: 105890.
- [22] 张慧, 栾思雨, 丛蓉. 东北黑土区典型县域耕地质量对耕地水田化的空间响应[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1): 327-334.
- ZHANG Hui, LUAN Siyu, CONG Rong. Spatial response of cultivated land quality to paddy farming in typical counties of northeast black soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1): 327-334. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [23] KAVEH N, EBRAHIMI A, ASADI E. Comparative analysis of random forest, exploratory regression, and structural equation modeling for screening key environmental variables in evaluating rangeland above-ground biomass[J]. *Ecological Informatics*, 2023, 77: 102251.
- [24] 王全喜, 宋戈, 隋虹均. 耕地“非农化”的时空格局演变及其驱动因素研究——基于影响分析与组态分析的双重视角[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(5): 113-124.
WANG Quanxi, SONG Ge, SUI Hongjun. Spatial-temporal pattern evolution of cultivated land conversion and its driving factors: A twofold perspectives of impact analysis and configuration analysis[J]. *China Land Science*, 2023, 37(5): 113-124. (in Chinese with English abstract)
- [25] XU F, WANG Z Q, CHI G Q, et al. The impacts of population and agglomeration development on land use intensity: New evidence behind urbanization in China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 95: 104639.
- [26] 吕晓, 孙晓雯, 彭文龙, 等. 基于能值分析的沈阳市耕地利用可持续集约化时空分异特征研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(9): 79-89.
- LYU Xiao, SUN Xiaowen, PENG Wenlong, et al. Spatial-temporal differentiation of sustainable intensification of cultivated land use in Shenyang City based on emergy analysis[J]. *China Land Science*, 2022, 36(9): 79-89. (in Chinese with English abstract)
- [27] JIANG K, TEULING A J, CHEN X, et al. Global land degradation hotspots based on multiple methods and indicators [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111462.
- [28] LIU Q F, JIANG H X, LI J M, et al. Antidote or poison? digital economy and land-use[J]. *Land Use Policy*, 2024, 139: 107083.
- [29] 时荣超, 郭文忠. 农业灌溉水资源优化配置研究进展[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 1-13.
SHI Rongchao, GUO Wenzhong. Research progress on the optimal allocation of agricultural irrigation water resources[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [30] AHAKWA I. Towards land degradation neutrality: Does green energy and green human capital matter[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 197: 114396.

Influence mechanism and governance strategies of cultivated land degradation in Lower Liaohe Plain from the mutual feedback perspective of quality and ecology

SONG Ge , CAI Zhaoyang , SUI Hongjun , SU Ruiqing

(1. Department of Land Resources Management, School of Humanities and Law, Northeastern University, Shenyang 110169, China;
2. Research Base of Land Use and Protection of Liaoning Province, Shenyang 110169, China; 3. Key Laboratory of Land Protection and Use, Department of Natural Resources of Liaoning Province, Shenyang 110169, China)

Abstract: Cultivated land degradation has seriously threatened to the national food security and sustainable land use. Among them, the sustainability of cultivated land can decrease or even completely lose, when it is subjected to the external disturbance. This temporal and spatial evolution can represent the cultivated land quality and ecological degradation. Significant mutual feedback between them can also impact the cultivated land degradation. It is crucial to clarify the mechanisms of cultivated land degradation and governance strategies, in order to ensure the national food security and sustainable utilization of cultivated land. Most existing studies have been focused on the evaluation and monitoring of cultivated land degradation. However, it is still lacking to consider the "comprehensive" interaction between the quality and ecological degradation of cultivated land. Furthermore, it is a high demand to clarify the influencing factors and mechanism of cultivated land degradation for the effective countermeasures. In this study, a novel system was constructed to measure the cultivated land degradation from the mutual feedback perspective of quality and ecology. Shenyang City in the typical Liaoning Plain area was also selected as the research area. The spatiotemporal characteristics, influence mechanisms and governance strategies of cultivated land degradation were explored using principal component analysis, objective weighting, exploratory regression, geographical weighted regression, quantile regression, and fuzzy data set comparison. The results show: 1) The proportion of cultivated land quality degradation was 35.31% in the study area, indicating a "strong east, weak west" spatiotemporal pattern; The proportion of cultivated land ecological degradation was 79.10%, with the spatiotemporal pattern of "strong north, weak south"; According to the quality and ecological mutual feedback, the proportion of cultivated land degradation was 37.80%, indicating a "strong north and south, weak middle" spatiotemporal pattern. 2) The temperature, vegetation coverage, urbanization, irrigation capacity and environmental pollution were the key natural conditions and socio-economic factors, leading to the degradation of cultivated land in the study area. The spatial heterogeneity was found in the effects of these factors on cultivated land degradation in different regions. There were the non-stationarity effects of development stages on the cultivated land degradation. Different structural configurations were formed to synergistically affect the cultivated land degradation. There were the regional, periodical, and structural influence mechanisms of cultivated land degradation. 3) According to the intensity of cultivated land degradation in the different regions, the different influencing factors and the action path of multi-factor combination, the graded and zonal protection of cultivated land was established to utilize and control the multi-factor concurrent collaborative governance and security path. The impact mechanism of cultivates land degradation was obtained from the perspective of quality and ecological mutual requirements. The finding can provide the policy reference for the accurate, efficient and collaborative management of degraded cultivated land. The synchronous quality and ecological environment of cultivated land can be expected to resist external adverse factors.

Keywords: cultivated land degradation; ecological degradation; cultivated land quality; influence mechanism; Lower Liaohe Plain