

下辽河平原典型地域耕地系统弹性时空分异特征

刘婉莹¹, 宋 戈^{1,2*}, 高 佳^{1,2}, 隋虹均¹, 王全喜¹

(1. 东北大学文法学院土地资源管理系, 沈阳 110169; 2. 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: 科学准确地刻画耕地系统弹性时空分异格局是制定耕地保护差别化管理制度的基本前提。为此, 该研究以下辽河平原典型地域沈阳市为研究区, 基于社会生态系统弹性思维的抵抗力-适应力-转型力视角, 重构耕地系统弹性的科学内涵, 探讨 2009—2018 年研究区耕地系统弹性时空分异特征及影响因素。结果表明: 1) 耕地系统弹性是由耕地系统的抵抗力、适应力和转型力共同作用的结果, 分别发挥维持现状、治理弹性和优化弹性的作用; 2) 2013 年为研究区耕地生产力发生突变的时间节点, 突变后期研究区整体和各区县的耕地系统弹性均显著减弱, 耕地系统适应力减弱是耕地系统弹性减弱的主要因素, 其次为转型力和抵抗力; 3) 突变前后研究区耕地系统弹性整体均呈现出中部高, 西北部低的空间分布格局, 高高型集聚的耕地向西部和北部迁移, 低低型集聚的耕地集中于南部; 4) 耕地系统弹性变化同时受人类活动和自然禀赋综合影响, 农业建设活动和自然条件分别是研究区中南部和西北部的耕地系统弹性空间分异的主要原因。研究表明阐明耕地系统抵抗力、适应力和转型力之间的作用关系可为刻画耕地系统弹性的时空分异格局提供有效途径, 据此构建差别化的耕地保护制度体系, 为实现下辽河平原农业的永续发展提供科学依据。

关键词: 耕地系统; 弹性; 时空分异; 下辽河平原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211081

中图分类号: F301.21; S282

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0252-09

刘婉莹, 宋戈, 高佳, 等. 下辽河平原典型地域耕地系统弹性时空分异特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 252-260.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211081 <http://www.tcsae.org>

LIU Wanying, SONG Ge, GAO Jia, et al. Spatiotemporal differentiation of arable land system resilience in the typical areas of Lower Liaohe Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 252-260. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211081 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

耕地系统弹性反映耕地在受到外部扰动时自身的适应能力和响应^[1], 其强弱表征耕地对农业灾害的缓冲以及适时释放外部压力的能力, 是充分掌握耕地系统可持续性和健康水平的有效途径^[2]。自 21 世纪以来, 高强度的人类活动与气候变化增加了农业灾害发生的频次与概率, 严重威胁着区域与国家的粮食安全, 同时也体现了耕地系统在面对外界环境胁迫时所表现出的敏感性和脆弱性。此外, 随着新型冠状病毒肺炎疫情在全球范围内的肆虐, 粮食安全再次遭遇挑战, 世界粮食计划署的相关数据表明 2020 年底将增加 1.3 亿人遭受严重的饥饿^[3]。探明区域耕地系统弹性的时空分异特征及影响因素是制定差别化耕地治理策略以提升耕地抗逆能力, 实现耕地可持续利用的重要科学命题。

当前针对耕地系统弹性内涵尚无明确统一的定论, 多数研究将耕地系统弹性理解为过程变量而非响应状态, 忽略了二者之间存在的动态反馈与差异。社会生态系统

弹性思维表明, 弹性是抵抗力、适应力和转型力共同作用的结果^[4-5], 为本文界定耕地系统弹性内涵和构建耕地系统弹性测度框架提供理论依据。在弹性测度方法方面, 学界主要采用突变级数法^[6]和多因素加权求和法^[7], 为实现耕地系统弹性的空间量化提供了依据, 但也存在一定欠缺。主要在于: 第一, 各指标的权重确定受人为主观意识控制, 无法反映出各指标对弹性影响的客观状态; 第二, 指标间的作用关系仍是线性累加, 难以表征耕地系统弹性的非线性复杂作用关系。在弹性测度阶段划分依据方面, 既有研究主要以短期调研数据和大尺度的年鉴数据为基础探讨省域^[2]和市域^[6]宏观尺度以及县域^[7]中观尺度的耕地系统弹性, 针对微观田块尺度的研究尚显不足, 难以满足新时期差别化治理耕地的需求。目前以耕地系统为对象进行弹性时空分析的研究较少, 主要对耕地系统的质量^[8]、安全^[9]、健康^[10-11]进行探讨; 学界对于弹性的研究则聚焦于乡村^[12]、森林^[13]、湿地^[14]、渔场^[15]等系统, 已有成果对本文具有重要借鉴意义。

因此, 本文在重构耕地系统弹性内涵的基础上, 以下辽河平原典型地域沈阳市为研究区, 采用土地利用、遥感等多源数据, 基于社会生态系统弹性思维, 从耕地系统抵抗力-适应力-转型力的视角出发, 运用 t 检验序格局转换、三维欧氏距离、探索性空间分析等方法, 构建耕地系统弹性测度框架, 识别 2009—2018 年研究区耕地生产力突变点, 分阶段测度耕地系统弹性, 明确其在微观尺度下的空间变化特征、集聚趋势及时空分异原因,

收稿日期: 2022-11-09 修订日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971247; 42101254); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (19YJC630037)

作者简介: 刘婉莹, 研究方向为土地利用与管理。Email: liuwanying1818@163.com。

*通信作者: 宋戈, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为土地利用与管理。Email: songgelaoshi@163.com。

旨在为差别化制定下辽河平原耕地保护适应性治理方案提供科学依据。

1 耕地系统弹性内涵的界定

耕地系统弹性 (arable land system resilience, ALSR) 反映耕地适应扰动的响应, 增强耕地系统弹性是避免耕地结构混乱甚至功能瓦解的重要途径^[16]。已有研究多从耕地系统内部和外部角度出发解构耕地系统弹性^[17-18], 较少考虑耕地系统弹性的动态性, 耕地系统弹性表现耕地的社会子系统和生态子系统经历扰动后在一定阶段内耦合协调的响应状态。社会生态系统弹性思维将弹性视为系统抵抗力 (resistivity, RE)、适应力 (adaptability, AD) 和转型力 (transformability, TR) 的互动结果 (简称“三力”), 突出了系统在一定阶段内的稳定性和动态性, 破解了静态探讨的局限性, 为准确理解和掌握耕地系统弹性的理论内涵提供了重要的参考。

本文基于此解构耕地系统弹性, 耕地系统在社会子系统与生态子系统交互过程中不仅形成了保障耕地产出的本底条件和有效管理耕地资源的治理能力, 即抵抗力和适应力, 分别是维持耕地系统弹性的基础源和治理耕地系统弹性的支撑与驱动, 还形成了与外部资源系统跨尺度交流的能力, 即转型力, 是优化耕地系统弹性的保障。耕地系统的抵抗力是耕地减少其结构混乱和功能退化的本底条件^[19], 通过耕地面积、耕地生产力、水土保持力和生物多样性维护力等特质来反映, 分别代表耕地数量稳定能力、生产功能和生态保育功能的恢复程度, 抵抗力越强, 耕地在遭受扰动后的结构与功能变化幅度越小^[5]。耕地系统的适应力是通过增加人力、资金、管理等治理措施以增强耕地适应扰动的能力, 通过集体行动能力和农业产值多样性^[20]来反映, 可采用灌溉基础设施维护力、粮食产值占农业产值 (包括粮食作物产值和经济作物产值) 的比例来表征^[21]。耕地系统的转型力是外源耕地系统通过学习和创新促使耕地系统发生积极转变的能力, 源于外源耕地系统的更新能力、学习创新能力和跨尺度连结能力的综合作用^[22], 可采用不稳定耕地面积转出强度、农业专业合作社影响力和道路连通度来表征 (图1), 其中不稳定耕地充分考虑影响耕地的社会经济、生产和生态稳定情况^[23], 用耕作便利性^[24]表征社会经济不稳定型耕地。

基于此, 综合考虑耕地系统的社会子系统和生态子系统交互过程中的稳定性需求, 兼顾耕地系统脆弱性, 从耕地系统抵抗力-适应力-转型力的视角出发, 本文所指的耕地系统弹性是耕地系统在应对外界压力冲击或经历变化的过程中, 通过自我调节以维持现状 (抵抗力)、施加干预以治理弹性 (适应力), 淘汰脆弱性以优化弹性 (转型力) 的方式, 维持内在功能结构和外在空间形态稳定, 保障粮食安全的综合能力。

结合耕地系统弹性内涵, 引入三维欧氏距离 (Euclidean distance) 原理, 以期更直观地解析和量化耕地系统弹性。本文把耕地系统的抵抗力、适应力和转型力映

射至空间直角坐标轴, 将空间中耕地系统弹性最弱的状态点与耕地系统弹性状态点之间的距离表征为耕地系统弹性。三维欧氏距离越大, 表征耕地系统弹性越强^[25] (图1)。

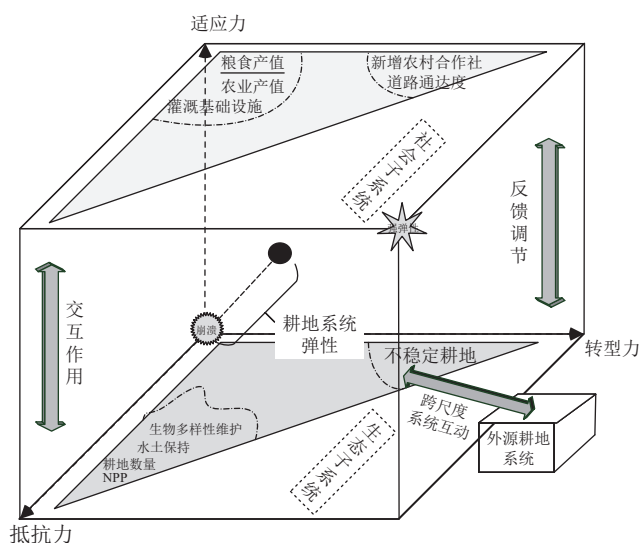


图1 耕地系统弹性内涵解构

Fig.1 Deconstruction of arable land system resilience

2 数据来源与理论方法

2.1 研究区概况

沈阳市 (122°25'~123°48'E, 41°12'~43°03'N) 位于辽宁省中北部, 现辖13个县 (市) 区, 是下辽河平原国土开发强度最大的区域。该市属暖温带大陆性季风气候, 年均温6.2~9.7℃, 年均降水量600~800mm。全市国土总面积12860km², 2018年全市耕地面积7918km², 约占全市国土面积的61%, 居全省耕地资源总量首位。辽河、浑河、蒲河、北沙河、绕阳河、柳河、养息牧河和秀水河8条大中型河流途径市内。2009—2018年研究区在快速城镇化进程中衍生的土地利用方式调整和环境问题消耗了耕地的生态价值, 同时, 气温与地温呈上升趋势, 降水量创1952年以来新高, 叠加夏旱、春夏连旱等, 农业灾害呈现“旱涝并发、旱涝急转”的特征, 短期内造成严重的农作物歉收及财产损失, 该市耕地缓冲高强度人类活动与农业灾害冲击的能力备受关注。沈阳市耕地资源集中分布于浑南区、苏家屯区、于洪区、沈北新区、康平县、法库县、新民市、辽中区8个县 (市) 区, 是下辽河平原优质稻米和玉米生产基地。本文将8个县 (市) 区的耕地资源作为研究对象, 空间上覆盖该市东南部和东北部低山丘陵区、以辽河为核心的区域及临近科尔沁沙地南缘的西北部地区。

2.2 数据来源与处理

本文使用的经济社会数据来源于2010、2014和2019年沈阳市统计年鉴、统计公报; 土地利用数据来源于2009、2013和2018年沈阳市土地利用变更数据库; 2009—2018年逐年植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 来源于500m空间分辨率MODIS产品

MOD17A3H, 土地覆被数据来源于 500 m 空间分辨率 MODIS 产品 MCD12Q1 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 耕地 NPP 是利用耕地覆被数据从植被净初级生产力数据中提取; 气象数据来源于国家地球系统科学数据中心 1 km 空间分辨率 2000—2020 年中国气温、降水数据集 (<http://www.geodata.cn/>); 土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>); 农业专业合作社点数据来源于天眼查网站 (<https://www.tianyancha.com/>); 30 m 分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 来源于地理空间数据云; 路网数据来源于 Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>)。基于 ArcGIS 重采样函数对数据进行重采样, 使其空间分辨率与测度单元相匹配。

2.3 耕地系统弹性测度框架的构建

2.3.1 耕地系统弹性测度阶段的划分

采用 t 检验序贯格局转换 (sequential t -test analysis of regime shifts, STARS) 方法探测 2009—2018 年研究区耕地生产力 (选取耕地 NPP 来表征^[26]) 发生突变的时间节点, 为定量划分耕地系统弹性测度阶段提供科学支撑。STARS 算法的原理是: 计算观测值在各时间节点前后的样本均值阶段差异, 在给定显著性水平下, 得到的稳态转变指数 (regime shifts index, RSI) 可反映观测值发生突变的时间节点。该算法有利于弥补一元线性回归法无法充分反映短期内耕地 NPP 的变化及剧烈程度的不足, 并实现准确度的提升^[27]。

2.3.2 耕地系统弹性测度单元的确定

结合景观形状指数 (landscape shape index, LSI) 修正研究区耕地系统弹性测度单元的大小。LSI 是通过计算区域内某斑块形状与相同面积的正方形之间的偏离程度来测量形状的复杂程度的景观指数^[28]。考虑到研究区耕地图斑破碎化程度高, 形状不规则, 因此, 利用研究区逐年位置未发生变化的耕地面积确定测度单元的平均面积, 并采用 LSI 根据耕地形状复杂程度进行修正, 最终计算得到本文的测度单元。计算式如下:

$$A_s = A_{\text{per}} \cdot (M_{\text{LSI}} - 1) \tag{1}$$

$$M_{\text{LSI}} = \frac{0.25 \cdot E}{\sqrt{A}} \tag{2}$$

式中 A_s 为评价单元边长, m; A_{per} 为位置不变的耕地平均边长, m; M_{LSI} 为景观形状指数均值; E 为图斑周长, m; A 为图斑总面积, m^2 。最后计算确定本文的测度单元为 80 m 地理网格。

2.3.3 耕地系统弹性测度指标体系的构建

依据耕地系统弹性内涵, 结合研究区实际情况, 从耕地系统的抵抗力-适应力-转型力维度构建耕地系统弹性测度指标体系, 共选取 9 个指标。以信息熵与特征权重的均值作为指标层权重 (表 1), 2009—2013 年各指标权重排序: 抵抗力 $p_2 > p_1 > e_2 > e_1$, 适应力 $s > r$, 转型力 $t > c > l$; 2013—2018 年各指标权重排序: 抵抗力 $p_2 > p_1 > e_1 > e_2$, 适应力 $s > r$, 转型力 $l > t > c$ 。

表 1 研究区耕地系统弹性测度指标体系

Table 1 Measuring indicator system of arable land system resilience (ALSR) in study area						
准则层 (权重) Criteria layer (Weight)		指标层 Index layer	指标说明及获取方法 Index definition and acquisition method	性质 nature	指标权重 Index weight	
一级 1 st	二级 2 nd				2009—2013	2013—2018
抵抗力 Resistivity RE (1/3)	生产功能维持力	耕地面积年均 不变量 $p_1/\%$	耕地数量波动情况, 耕地面积不变量/ 测度单元/研究期 $\times 100$	+	0.25	0.24
		耕地 NPP 变化率 $p_2/\%$	耕地生产力波动情况, 在 matlab 中构建拟合 模型计算耕地 NPP 斜率 (变化斜率法)	—	0.41	0.45
	生态功能维持力	生物多样性 年均增长率 e_1	耕地生态保育功能变化情况, 根据文献 ^[29] 计算 生物多样性维护功能指数和水土保持功能指数	+	0.16	0.21
		水土保持力 年均增长率 e_2		+	0.18	0.10
适应力 Adaptability AD (1/3)	集体行动能力	灌溉基础设施维护 力年均量 $s/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$	耕地系统自组织、抗旱能力 (产出角度), 研究期 内逐年 (有效灌溉面积/农作物播种面积) 的和/研究期	+	0.64	0.72
	产值多样性	农业产值来源多 样性年均增长率 $r/\%$	耕地系统应对扰动方式的多样性, (人均粮食作物产 值/人均农业产值) 变化/初始年产量/研究期 $\times 100$	+	0.36	0.28
转型力 Transformability TR (1/3)	系统更新能力	不稳定耕地面积净转 出强度年均增长率 $t/\%$	结构变换和地类调整的可控能力, 净转出面积/测度单元/初始年面积/研究期 $\times 100$	+	0.35	0.33
	学习创新能力	农业专业合作社 核密度年均增长率 l	耕地系统的创新和调整能力, 将农业专业合作社 与土地利用变更数据库的坐落地物 名称字段进行连接以展布至空间, 利用 ArcGIS 的核密度工具计算其影响力	+	0.32	0.36
	跨尺度连接能力	道路连通度 年均增长率 c	耕地系统与外源系统交流的主动性, 利用 ArcGIS 的欧式距离计算快速路的连通度	+	0.33	0.31

2.3.4 指标格网化法

利用指标格网化法^[30], 根据表征空间权重的修正指标, 将以区县为单元的农业产值来源多样性和灌溉基础设施维护程度指标的观测值展布至 80 m 测度单元, 以增强测度结果空间异质性。基于数据获取情况及研究实际, 采用耕地 NPP 作为农业产值来源多样性的修正指标; 采

用耕地到“水库水面、坑塘水面、沟渠与水工建筑用地”的最短距离作为灌溉基础设施维护程度的修正指标。计算式如下:

$$B_{ij} = B \cdot \left(\frac{D_{ij}}{S_d} \right) \tag{3}$$

式中 B_{ij} 是空间化后的网格单元值; B 为该网格所在区县

的指标观测值；以农业产值来源多样性计算为例， D_{ij} 为该网格单元的耕地 NPP 值， g/m^2 ； S_D 为该网格单元所在县级行政区的耕地 NPP 总量， g/m^2 。

2.3.5 耕地系统弹性强弱度的测度

基于耕地系统弹性内涵解构，采用三维欧氏距离表征耕地系统弹性强弱。三维欧氏距离是多变量分析中常用的三维空间距离测度，要求观测值转化为标准化的三维坐标点，本文采用极值标准化法对原始数据进行无量纲处理。耕地系统弹性测度模型如下：

$$V_{\text{ALSR}} = \sqrt{(V_{\text{RE}}^2 + V_{\text{TR}}^2 + V_{\text{AD}}^2)} \quad (4)$$

式中 V_{ALSR} 表示耕地系统弹性值。 V_{RE} 、 V_{TR} 、 V_{AD} 分别抵抗力、转型力、适应力值。

2.4 耕地系统弹性空间分异格局的识别

采用探索性空间数据分析^[31] (Exploratory spatial data analysis, ESDA) 的全局空间自相关指数 (Global Moran's I, I) 和局部空间自相关指数 (Local Moran's I, I_i) 分别检验研究区耕地系统弹性总体空间模式及内部空间单元与邻近单元属性值的相似性和相异性。

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n z_i z_j} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{w_{i,j}} \quad (5)$$

$$Z_i = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (6)$$

$$I_i = \frac{n \sum_j w_{ij} z_i z_j}{\sum_i z_i^2} \quad (7)$$

式中 z_i 和 z_j 分别表示评价单元 i 和 j 的属性值与各自平均值的偏差， $w_{i,j}$ 为评价单元 i 和 j 之间的空间权重， n 为空间单元数； Z_i 为全局自相关指数标准化统计量； $E[I]$ 为网格 i 的期望值； $V[I]$ 为方差。

3 结果与分析

3.1 研究区耕地系统弹性总体水平分析

基于 R 软件运行 STARS 算法，2013 年 RSI 指数为 0.54，表明 2013 年前后研究区耕地 NPP 均值发生突变，与 2009—2012 年相比，2013 年后研究区耕地 NPP 均值呈明显下降趋势，从 $422.31 \text{ g}/\text{m}^2$ 下降至 $388.71 \text{ g}/\text{m}^2$ 。因此，

本文将 2013 年作为划分 2009—2018 年研究区耕地系统弹性测度阶段的时间节点，分阶段测度耕地系统弹性。

2009—2018 年研究区耕地系统的抵抗力、适应力、转型力和弹性变化具有阶段性 (表 2)。从数值来看，2009—2018 年耕地系统三力强度从大到小依次为：抵抗力 (0.67~0.69)、转型力 (0.43~0.47)、适应力 (0.21~0.28)，表明研究区耕地资源本底的生产和生态功能较高，抵抗力较强，但不稳定耕地的转出力度、农业合作社影响力和道路连通度影响力较低，尤其缺乏集体行动力和产业多样性以适应外界扰动，转型力和适应力较弱。从阶段变化来看，三力均呈减弱趋势，减弱幅度从大到小依次为适应力 (-0.07)、转型力 (-0.04)、抵抗力 (-0.02)。相应地，耕地系统弹性高值区 (0.96~1.29) 的测度单元数占总数的比例从 16.86% 减少至 13.81%，耕地系统适应力的减弱是耕地系统弹性总体减弱的主要因素，其次为转型力和抵抗力。基于 SPSS26 软件平台，对 2009—2013 年和 2013—2018 年耕地系统弹性进行成对样本 t 检验，结果显示，两个阶段的耕地系统弹性存在显著差异，2013—2018 年较 2009—2013 年总体减弱了 0.06 ($P < 0.01$)。按测度单元统计，耕地系统弹性显著增强 (0.11~0.41)、轻微增强 (0.01~0.10)、轻微减弱 (-0.16~0) 和显著减弱 (-0.63~-0.15) 的单元数占总数的比例分别为 5.34%、32.66%、51.44% 和 10.55%，研究区耕地系统弹性变化以轻微增强和轻微减弱为主。

表 2 2009—2018 年研究区耕地系统弹性测度结果
Table 2 Calculation results of arable land system resilience in study area from 2009 to 2018

指标 Indicator	2009—2013	2013—2018	变化值 Change value
RE	0.69	0.67	-0.02**
AD	0.28	0.21	-0.07**
TR	0.47	0.43	-0.04**
ALSR	0.89	0.83	-0.06**

注：**表明在 1% 的水平下显著，下同。

Note: ** indicates significance at the 1% level, same below.

3.2 研究区县域耕地系统弹性水平分析

通过比较分析研究区各区县的耕地系统抵抗力、适应力、转型力和耕地系统弹性的变化情况 (表 3)，掌握研究区各区县耕地系统弹性水平及其变化特征。

表 3 2009—2018 年研究区各区县耕地系统弹性测度结果

Table 3 Calculation results of arable land system resilience in the districts and counties of the study area from 2009 to 2018

区县 Districts and counties	2009—2013				2013—2018				变化值 Change value			
	RE	AD	TR	ALSR	RE	AD	TR	ALSR	RE	AD	TR	ALSR
法库县 Faku county	0.70	0.22	0.45	0.86	0.67	0.19	0.43	0.82	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04**
浑南区 Hunnan district	0.69	0.23	0.49	0.88	0.66	0.18	0.42	0.80	-0.03	-0.05	-0.07	-0.08**
康平县 Kangping county	0.66	0.24	0.42	0.82	0.67	0.17	0.38	0.80	0.01	-0.07	-0.04	-0.02**
辽中区 Liaozhong district	0.69	0.35	0.45	0.89	0.64	0.18	0.41	0.79	-0.05	-0.17	-0.04	-0.10**
沈北新区 Shenbei new district	0.71	0.25	0.49	0.90	0.68	0.18	0.44	0.84	-0.03	-0.07	-0.05	-0.06**
苏家屯区 Sujiatun district	0.70	0.35	0.45	0.90	0.65	0.15	0.41	0.78	-0.05	-0.20	-0.04	-0.12**
新民市 Xinmin city	0.68	0.23	0.50	0.88	0.67	0.20	0.50	0.87	-0.01	-0.03	0.00	-0.01**
于洪区 Yuhong district	0.70	0.40	0.49	0.95	0.69	0.39	0.44	0.92	-0.01	-0.01	-0.05	-0.03**

从总体来看，与其他区县相比，于洪区耕地系统弹性在 2009—2018 年始终最强，适应力始终最强。研究期内该区将农业与蒲河生态结合并优先开展以“农业、工

业、服务业联动”集群式发展为主要功能导向的现代农业，重点发展农产品加工、生态型休闲农业和智慧数字农业，农业经营现代化和多样化的高效提升增强了耕地

适应外界扰动的能力。新民市耕地系统转型力在研究期内始终最强,康平县则始终最弱。新民市毗邻沈阳主城区,是“沈阳阜新新城际连接带”重要节点,承接进军沈阳的国内外资本和产业,且耕地面积居全市首位,形成了以“新民新城辽宁最大的农产品专业批发中心”为重点的产业布局,为该区农业发展提供外界资源,加深先进农业技术和知识的交流,为推进农业规模利用提供基础条件。而康平县区位极具特殊性,一方面是阻止科尔沁沙地南移的生态屏障,沙漠化严重,导致该区耕地系统抵抗力不强,另一方面也是研究区经济腹地向北延伸的重要节点,受经济跨越式发展的影响,公服设施不足、生态环境恶化等问题影响该县实现传统农业向现代农业的转型。

从变化趋势来看,研究区各区县耕地系统弹性整体减弱,其中,新民市耕地系统弹性最稳定、转型力变化幅度最小,苏家屯区耕地系统弹性波动最大、适应力变化幅度最大。除康平县耕地系统抵抗力增加 0.01 外,研究区各区县耕地系统三力普遍减弱,辽中区耕地系统抵抗力减弱幅度最大,浑南区耕地系统转型力减幅最大。康平县作为传统农业大县,通过推进高标准农田建设,承担国家农产品质量安全示范县和国家农产品出口示范区的政治责任,耕地本底条件维持水平较高。2009—2018 年研究区在已有资源环境和生产力发展约束下,耕地特别是基本农田保护形势十分严峻,优质耕地集中分布区与城镇化核心区产生空间冲突、耕地占沙化土地面积的比例增加,粮食生产波动大、生态敏感区及适宜建设区与现状耕地重叠等,表征着该地区耕地应对外界扰动的能力削弱,尤其是靠近城市中心的耕地,耕地保护压力增大。

3.3 研究区耕地系统弹性时空分异规律

3.3.1 耕地系统弹性时空变化特征

从总体来看,2009—2018 年研究区耕地系统弹性呈现中部强,西北部弱的特征(图 2a)。耕地系统弹性高值区(值大于 0.95)集中分布于研究区中部的新民市、于洪区以及辽中区的辽河、浑河间冲积平原地区,耕地系统弹性低值区(值不大于 0.95)集中分布于研究区西北部的康平县北部沙区和法库县西北部剥蚀丘陵地区。

从变化趋势来看,10 a 间研究区耕地系统弹性变化呈现明显的空间分异特征,增强区西移北扩,减弱区南移东扩(图 2b)。与 2009—2013 年相比,2013—2018 年研究区耕地系统弹性显著增强区和轻微增强区向西北部的生态屏障、西部的秀水河、养息牧河、柳河和绕阳河生态廊道移动,表明位于研究区耕地系统弹性较弱的西北部,在经过生态环境治理后,耕地系统弹性呈增强趋势。耕地系统弹性显著减弱区和轻微减弱区往东南部低山丘陵和辽河、浑河、北沙河下游移动,说明耕地系统弹性较强的中南部区域,其耕地系统弹性呈不同程度的减弱趋势。

3.3.2 耕地系统弹性的空间自相关分析

利用 GeoDa 软件分别对 2009—2013 年和 2013—

2018 年研究区的耕地系统弹性进行全局空间自相关分析可得,耕地系统弹性 Moran's I 均大于 0.70,经过 999 次置换运算,在 0.1% 显著性水平下, Z 值均大于 1000,表明至少有 99.9% 的概率说明两个阶段的研究区耕地系统弹性均存在高度全局空间正相关性。

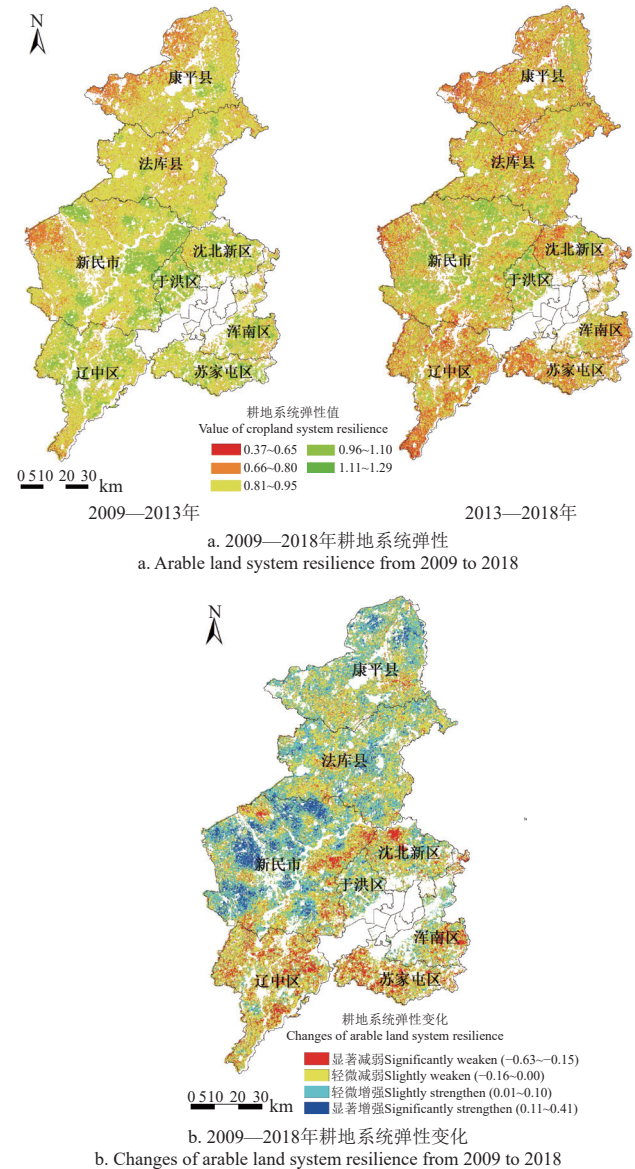


图 2 耕地系统弹性的时空分异
Fig.2 Spatiotemporal differentiation of arable land system resilience

运用局部空间自相关分析研究区内部空间单元间的相关性。10 a 间,研究区耕地系统弹性呈现明显的地域集聚性特征,均以 HH (高高)型和 LL (低低)型为主,NS (不显著)型次之、HL (高低)型和 LH (低高)型最少。2009—2013 年研究区耕地系统弹性 HH 型以组团状和条带状分布在研究区东南部和河流附近(图 3a),2013—2018 年则多以集中于研究区中部的团块状呈现(图 3b)。与 2009—2013 年比较,2013—2018 年研究区耕地系统弹性 HH 型聚集面积占总面积比例减少的区域分布在东南部低山丘陵区、辽河冲积平原的南部、辽河生态景观

发展带的东部。研究区耕地系统弹性 LL 型集聚从集中于西北部转变为南部, 呈现南扩的特征。

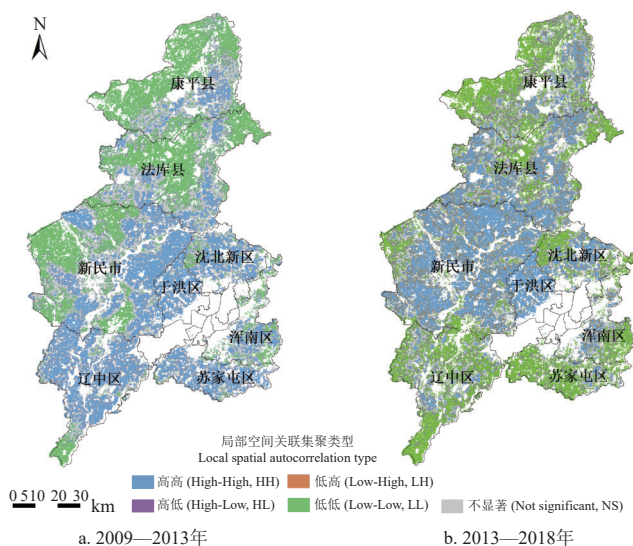


图3 2009—2018年研究区耕地系统弹性局部空间关联集聚
Fig.3 Local spatial autocorrelation of arable land system resilience in study area from 2009 to 2018

3.3.3 耕地系统弹性时空分异原因分析

就耕地系统弹性强弱空间分异而言, 2009—2018年研究区中南部受土地整治重点工程等农业建设活动影响较大, 西北部受自然条件变化和生态治理项目影响较大。耕地系统弹性高值区集中于研究区中部, 该区域积极开展土地整治工程, 基本农田集中连片、农业设施完善, 水土资源协调, 受气候变化影响较小, 适应力较强, 是重要的商品粮基地和优质稻米生产基地。耕地系统弹性低值区集中于研究区西北部, 该区域受自然约束较大, 生态环境相对脆弱, 沙漠化严峻, 耕地资源受干旱、水土流失和风蚀影响大, 产能较低, 抵抗力和转型力较弱。

就耕地系统弹性变化的时空分异而言, 研究区耕地系统弹性变化受自然禀赋和社会经济条件共同影响。耕地系统弹性增强区靠近半干旱半湿润区过渡带, 气候动态性强, 表明气候变化较强烈的区域更能适应旱涝灾害, 具有更强的耕地系统弹性, 这与 MIHUNOV 等^[32] 结论一致。此外, 2013 年以来, 该区域开展扩林增绿行动、建立农田防护林体系和实施生态经济等荒漠生态治理措施, 增强了防风固沙和耕地应对自然灾害的多样性能力。耕地系统弹性减弱集中于研究区中南部的主要原因在于: 1) 河流上游经过沈阳市主城区, 污水处理率较低, 致使下游区域水污染问题始终突出; 2) 经济社会用水挤占生态、环境用水, 导致河流下游泄水量减少; 3) 受气温升高的影响, 蒸发力度加强, 盐渍化形势严峻; 4) 单一水稻种植结构致使农业收入来源单一化, 进而给该区域耕地系统弹性带来负外部效应。

就农业现代化水平空间自相关的影响机制而言, 空间集聚特征取决于农业的经济和社会特性^[33]。耕地系统弹性 HH 型从条块状为主转变为以团块状集中于研究区中部, 表明在 HH 型在人为干预下逐渐形成规模效应,

得益于中部区域集中开展优质基本农田建设工程和农用地整理工程。耕地系统弹性 LL 型南扩, 这与该区域耕地细碎化严重, 影响耕作规模化和农业生产经营现代化有关, 此外, 辽河以南区域温度上升, 降水年际变化率增大, 地势低平叠加人类不合理耕作活动, 受暴雨洪涝等自然灾害影响较大, 与耕地系统弹性减弱区空间分布吻合。

4 结 论

本研究以下辽河平原典型地域沈阳市为研究区, 从耕地系统的抵抗力-适应力-转型力视角出发, 采用 t 检验序贯格局转换、三维欧氏距离和探索性空间分析等方法, 测度 2009—2018 年研究区耕地系统弹性强弱, 刻画耕地系统弹性时空分异格局, 并分析其原因。主要研究结论如下:

1) 耕地系统弹性是由耕地系统的抵抗力、适应力和转型力共同作用的结果。2013 年为研究区耕地生产力发生突变的年份, 突变后期耕地系统弹性显著降低。耕地系统弹性高值区 (0.96~1.29) 的测算单元数占总数的比例从 16.86% 减少至 13.81%。突变前期 (2009—2013 年) 研究区耕地系统弹性为 0.89, 突变后期 (2013—2018 年) 为 0.83, 突变前后耕地系统弹性显著减弱了 0.06 ($P < 0.01$), 耕地系统适应力的减弱是耕地系统弹性总体减弱的主要因素, 其次为转型力和抵抗力。

2) 10 a 间研究区各区县的耕地系统抵抗力、适应力、转型力及弹性均呈减弱趋势。除康平县耕地系统抵抗力增加 0.01 外, 各区县耕地系统三力普遍减弱, 辽中区耕地系统抵抗力减弱幅度最大, 浑南区耕地系统转型力减幅最大, 这与中南部受城镇化和洪涝灾害的影响有关。新民市耕地系统转型力始终最强, 康平县耕地系统转型力始终最弱, 这与区位条件和基础设施相关。于洪区耕地系统弹性在 2009—2018 年维持最强水平, 新民市耕地系统弹性最稳定, 苏家屯区耕地系统弹性波动最大。

3) 2009—2018 年耕地系统弹性空间分异特征显著, 基本呈中部强, 西北部弱的分布态势。与 2009—2013 年相比, 2013—2018 年研究区耕地系统弹性高值区呈西移北扩的特征, 弹性低值区呈南移东拓的特征。研究期间研究区耕地系统弹性呈明显的地域集聚性特征。研究区耕地系统弹性高高型以组团状和条带状集聚在中部与南部转变为以团块状集聚在西部与北部, 南部低低型集聚逐渐凸显, 其他相关类型较少且零星分散。

4) 研究区不同区域的耕地系统弹性强弱受不同主导因素影响, 中南部受农业建设活动影响较大, 西北部、北部受自然条件和生态治理项目影响较大。研究区耕地系统弹性变化受自然禀赋和社会经济条件共同影响。耕地系统弹性高高型在人为干预下逐渐形成规模效应, 气候变化和洪涝灾害是低低型南扩的主要原因。

下辽河平原作为全国优质稻米和玉米的生产基地, 粮食安全备受关注, 但农业灾害和城镇化快速演进使得单纯追求耕地资源在预期稳态下最大产量的传统思路已

无法适应新时代要求, 深入探究耕地系统弹性时空分异特征有助于明晰耕地系统适应气候变化和人类扰动交互影响的能力及其发展趋势。本文将社会生态系统弹性思维和三维欧氏距离引入至耕地系统弹性测度研究中, 将耕地系统弹性看作由耕地系统的抵抗力、适应力和转型力共同作用的结果, 基于此构建的耕地系统弹性测度理论框架拓宽了耕地保护研究的视野, 为耕地系统弹性时空分异特征分析提供方法论和思路, 突破了传统定性研究的局限。然而, 耕地系统弹性与社会经济基础有紧密联系, 尤其在量化社会经济层面指标和对其进行空间展布的方法等方面仍有待进一步讨论完善。人类可以通过社会治理增强耕地系统弹性, 研究区通过开展山水林田湖生态保护修复工程、辽河流域综合治理工程和发展生态经济等适应性治理策略促进了农业经营现代化、增加了农民收入来源多样性, 从而提高了研究区西部和北部的耕地系统弹性, 因此, 基于适应性治理理论对耕地系统弹性进行有效治理是下一步研究的方向。

【参 考 文 献】

- [1] VIGANI M, DWYER J. Profitability and efficiency of high nature value marginal farming in England[J]. *Journal of Agricultural Economics*, 2019, 71(2): 439-464.
- [2] 赵华甫, 屈雪冰, 冯新伟, 等. 耕地的弹性变形理论及实证研究[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(2): 73-77.
ZHAO Huaifu, QU Xuebing, FENG Xinwei, et al. The resilience deformation theory of cultivated land and its empirical research[J]. *Areal Research and Development*, 2012, 31(2): 73-77. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈志钢, 詹悦, 张玉梅, 等. 新冠肺炎疫情对全球食物安全的影响及对策[J]. *中国农村经济*, 2020(5): 2-12.
CHEN Zhigang, ZHAN Yue, ZHANG Yumei, et al. The impact of COVID-19 on global food security and the coping strategy[J]. *Chinese Rural Economy*, 2020(5): 2-12. (in Chinese with English abstract)
- [4] WALKER B H, NICK A, ANDERIES J M, et al. Resilience, adaptability, and transformability in the Goulburn-Broken Catchment, Australia[J]. *Ecology and Society*, 2009, 14(1): 12.
- [5] ZIMMERMAN J K, WILLIG M R, HERNANDEZ-DELGAODO E A. Resistance, resilience, and vulnerability of social-ecological systems to hurricanes in Puerto Rico[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(10): 1-27.
- [6] 李宸琪, 张翊, 付保红, 等. 昆明市耕地韧性评价及空间差异[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 4848-4855.
LI Chengqi, ZHANG Yi, FU Baohong, et al. Resilience evaluation and spatial difference of cultivated land system in Kunming[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(12): 4848-4855. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孟丽君, 黄灿, 陈鑫, 等. 曲周县耕地利用系统韧性评价[J]. *资源科学*, 2019, 41(10): 1949-1958.
MENG Lijun, HUANG Can, CHEN Xin, et al. Evaluation of cultivated land system resilience of Quzhou county[J]. *Resources Science*, 2019, 41(10): 1949-1958. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孔祥斌, 张蚌蚌, 温良友, 等. 基于要素-过程-功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(9): 14-20.
- [9] KONG Xiangbin, ZHANG Bangbang, WEN Liangyou, et al. Theoretical framework and research trends of cultivated land quality based on elements-process-function[J]. *China Land Science*, 2018, 32(9): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [9] 侯兰功, 牟月华, 乔标. 基于脱钩理论的川北传统农业区域城镇化水平与耕地安全耦合研究——以绵阳市三台县为例[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(4): 92-96, 115.
HOU Langong, MOU Yuehua, QIAO Biao. Coupling study of urbanization level and farmland security in traditional agricultural areas in north Sichuan based on decoupling theory: A case study of Santai county, Mianyang city[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(4): 92-96, 115. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈文广, 孔祥斌, 温良友, 等. 基于需求-功能-维度的耕地健康评价指标体系构建与应用[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(5): 106-117.
CHEN Wenguang, KONG Xiangbin, WEN Liangyou, et al. Construction and application of cultivated land health evaluation index system based on demand-function-dimension[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(5): 106-117. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张小丹, 吴克宁, 赵瑞, 等. 县域耕地健康产能评价[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 295-300.
ZHANG Xiaodan, WU Kening, ZHAO Rui, et al. Evaluation of healthy productivity of cultivated land at county scale[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 295-300. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘润秋, 黄志兵, 曹骞. 基于乡村韧性视角的宅基地退出绩效评估研究——以四川省广汉市三水镇为例[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(2): 41-48.
LIU Runqiu, HUANG Zhibing, CAO Qian. Performance evaluation of rural residential land exit from the perspective of rural resilience: A case of Sanshui Town, Guanghan City, Sichuan Province[J]. *China Land Science*, 2019, 33(2): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [13] REYER C P O, BROUWERS N, RAMMIG A, et al. Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: approaches and challenges[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 5-15.
- [14] LI Y, SHI Y, QURESHI S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 42: 135-146.
- [15] ARLINGHAUS R, ALÓS J, BEARDMORE B, et al. Understanding and managing freshwater recreational fisheries as complex adaptive social-ecological systems[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2016, 25(1): 1-41.
- [16] 李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰. 多重压力胁迫下东北黑土区耕地韧性研究及其启示——以黑龙江省拜泉县为例[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 71-79.
LI Yuheng, HUANG Huiqian, GUO Tongbing. Research on cultivated land resilience of the black soil region in the Northeast China under multiple stresses and its implications: The study of Baiquan County, Heilongjiang province[J].

- China Land Science, 2022, 36(5): 71-79. (in Chinese with English abstract)
- [17] 祝锦霞, 潘艺, 张艳彬, 等. 种植类型变化对耕地系统韧性影响的关键阈值研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(4): 49-58.
ZHU Jinxia, PAN Yi, ZHANG Yanbin, et al. Research on the key threshold of the resilience of social ecological system of cultivated land and adaptive policy under planting changes[J]. China Land Science, 2022, 36(4): 49-58. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吕晓, 王亚男, 王柏源. 韧性理论视角下耕地利用与保护的若干思考[J]. 中国土地, 2022, 436(5): 16-19.
LV Xiao, WANG Yanan, WANG Baiyuan. Some thoughts on cultivated land utilization and protection from the perspective of resilience theory[J]. China Land, 2022, 436(5): 16-19. (in Chinese with English abstract)
- [19] MAMUM A A, ISLAM A M T, ALAM E, et al. Assessing riverbank erosion and livelihood resilience using traditional approaches in Northern Bangladesh[J]. Sustainability, 2022, 14(4): 2348.
- [20] CARPENTER S, WALKER B, ANDERIES J M, et al. From metaphor to measurement: Resilience of what to what?[J]. Ecosystems, 2014, 4(8): 765-781.
- [21] 苏毅清, 秦明, 王亚华. 劳动力外流背景下土地流转对农村集体行动能力的影响——基于社会生态系统 (SES) 框架的研究[J]. 管理世界, 2020, 36(7): 185-198.
SU Yiqing, QIN Ming, WANG Yahua. The impact of farmland transfer on rural collective action under the scenario of labor outmigration: A research based on Social-Ecological System (SES) framework[J]. Management World, 2020, 36(7): 185-198. (in Chinese with English abstract)
- [22] BARRIOS E, GEMMILL-HERREN B, BICKSLER A, et al. The 10 elements of agroecology: Enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives[J]. Ecosystems and People, 2020, 16(1): 230-247.
- [23] 张红旗, 李达净. 西北干旱区不稳定耕地概念与分类研究——以新疆昌吉州为例[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 597-612.
ZHANG Hongqi, LI Dajing. Concept and classification of unstable farmland in arid area of Northwest China: A case study of Changji Prefecture, Xinjiang[J]. Geographical Research, 2021, 40(3): 597-612. (in Chinese with English abstract)
- [24] 隋虹均, 张慧, 乔广印, 等. 黑龙江垦区农户散居住宅格局影响机制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 284-291.
SUI Hongjun, ZHANG Hui, QIAO Guangyin, et al. Influence mechanism of farmers' diaspora housing pattern in Heilongjiang reclamation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 284-291. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨世琦. 基于欧氏距离的农业可持续发展评价理论构建与实例验证[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3840-3848.
YANG Shiqi. A case study of a novel sustainable agricultural development evaluation method based on Euclidean distance theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3840-3848. (in Chinese with English abstract)
- [26] SMITH W K, CLEVELAND C C, REED S C, et al. Agricultural conversion without external water and nutrient inputs reduces terrestrial vegetation productivity[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41: 449-455.
- [27] 李延森, 周金星, 吴秀芹. 青藏铁路 (格拉段) 修建对沿线植被生态系统及其弹性的影响[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2129-2140.
LI Yansen, ZHOU Jinxing, WU Xiuqin. Effects of the construction of Qinghai-Tibet railway on the vegetation ecosystem and eco-resilience[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2129-2140. (in Chinese with English abstract)
- [28] 罗红, 陈磊, 姜运力. 自然保护区整合优化的景观格局变化分析——以贵州省思南县为例[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8076-8086.
LUO Hong, CHEN Lei, JIANG Yunli, et al. Landscape pattern changes and analysis for the integration and optimization of natural protected areas: A case study on Sinan County of Guizhou province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8076-8086. (in Chinese with English abstract)
- [29] YANG Y J, SONG G, LU S. Study on the ecological protection redline (EPR) demarcation process and the ecosystem service value (ESV) of the EPR zone: A case study on the city of Qiqihaer in China[J]. Ecological Indicators, 2020, 109: 105754.
- [30] 李鹏, 王英杰, 虞虎, 等. 基于 GIS 格网化分析支撑的旅游空间规划技术方法研究——以青岛市为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 813-827.
LI Peng, WANG Yingjie, YU Hu, et al. Study on method of tourism spatial planning based on GIS grid analysis - An example of Qingdao[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 813-827. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王录仓, 高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究——以张掖绿洲为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1888-1901.
WANG Lucang, GAO Jing. Spatial coupling relationship between settlement and land and water resources based on irrigation scale-A case study of Zhangye city[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1888-1901. (in Chinese with English abstract)
- [32] MIHUNOV V V, LAM N S N, ZOU L, et al. Community resilience to drought hazard in the south-central United States[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 108(3): 739-755.
- [33] 龙小翠, 凌莉, 刘京, 等. 陕西关中农业现代化时空分异特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 250-258.
LONG Xiaocui, LING Li, LIU Jing, et al. Spatiotemporal differentiation characteristics of agricultural modernization in Guanzhong Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(5): 250-258. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal differentiation of arable land system resilience in the typical areas of Lower Liaohe Plain of China

LIU Wanying¹, SONG Ge^{1,2*}, GAO Jia^{1,2}, SUI Hongjun¹, WANG Quanxi¹

(1. Department of Land Resources Management, School of Humanities and Law, Northeastern University, Shenyang 110169, China;

2. Key Laboratory of Land Protection and Use, Department of Natural Resources of Liaoning Province, Shenyang 110169, China)

Abstract: Arable land system resilience can be one of the most important indicators for the state and response of arable land resources to various disturbances. It is a high demand to enhance the arable land system resilience, in order to avoid the chaos of arable land structure and even the collapse of function. Socio-ecosystem resilience refers to the social and ecological system as an interactive combination of resistivity, adaptability, and transformability. The static limitations can be broken to accurately understand the theoretical connotation of arable land system resilience. Taking Shenyang City in the Lower Liaohe Plain as the research area, this study aims to reconstruct the scientific connotation of arable land system resilience from the perspective of resistivity-adaptability-transformability in the socio-ecosystem resilience. The sequential t-test analysis of regime shifts, three-dimensional Euclidean distance, and exploratory spatial data analysis was used to explore the spatiotemporal differentiation characteristics and influencing factors of arable land system resilience in the study area from 2009 to 2018. The results show that: 1) Arable land system resilience was attributed to the joint action of resistivity, adaptability, and transformability of arable land system, in order to maintain the status quo, govern, and optimize the resilience, respectively. 2) 2013 was the mutation year of arable land productivity from 2009 to 2018. The arable land system resilience was significantly weakened in the late mutation period. The adaptability of the arable land system contributed to the main factor for the decreasing of arable land system resilience, followed by transformability, and resistivity. 3) Arable land system resilience before and after the mutation showed a spatial distribution pattern of high resilience in the middle and low resilience in the northwest of the study area. Compared with 2009-2013, the high-value area of arable land system resilience from 2013 to 2018 showed the characteristics of westward movement and northward expansion, whereas, the low-value area of resilience showed the characteristics of southward movement and eastward expansion. The arable land system resilience showed outstanding regional agglomeration. The High-High (HH) type of arable land system resilience was changed from the group and banded agglomeration in the middle and south to mass agglomeration in the west and north. There was the gradually prominent Low-Low (LL) type agglomeration in the south. 4) The arable land system resilience was affected by both human activities and natural endowment. Agricultural construction activities and natural conditions were the main reasons for the spatial differentiation of arable land system resilience in the central and southern and northwestern parts of the study area. The HH type of arable land system resilience gradually formed the scale effect under human intervention. By contrast, climate change and flood disasters were the main reasons for the southward expansion of LL type. Human activities enhanced the arable land system resilience through social governance. The modernization of agricultural management can be expected to promote a better diversity of income sources. Adaptive governance strategies can also be implemented, such as the ecological protection and restoration project of mountains, rivers, forests, fields, and lakes. The comprehensive management project can also be launched for the development of the ecological economy in the Lower Liaohe River Basin. As such, the arable land system resilience can be improved in the western and northern parts of the study area. The relationship between resistivity adaptability and transformability can provide an effective way to describe the spatial and temporal differentiation pattern of arable land system resilience. A differentiated arable land protection system can be constructed for the sustainable development of agriculture in the lower Liaohe Plain.

Keywords: arable land system; resilience; spatiotemporal differentiation; Lower Liaohe Plain