

引用格式: 苗欣然, 李泽红, 王梦媛. 粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变: 以齐齐哈尔市为例[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1801–1816. [Miao X R, Li Z H, Wang M Y. Spatiotemporal changes of cultivated land use system resilience in the black soil region of Northeast China under food supply security: A case study of Qiqihar City[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1801–1816.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.08

粮食供应安全下东北黑土区耕地利用系统韧性时空演变 ——以齐齐哈尔市为例

苗欣然^{1,2}, 李泽红^{1,2}, 王梦媛^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源环境学院, 北京 100049)

摘要:【目的】本文旨在基于耕地利用系统的自组织特征和韧性过程属性, 解析粮食供应安全下耕地利用系统韧性的内涵, 揭示黑土区耕地利用系统韧性时空演变规律与制约因素, 为黑土地可持续利用提供对策。【方法】以齐齐哈尔市为研究区, 在耕地时空变化研究的基础上, 围绕黑土地保护政策及相关问题、韧性发生过程和内涵表征、耕地利用系统组成建立多维耕地韧性评价指标体系, 采用PSR模型在格网尺度对耕地利用系统韧性进行评价, 综合分析了2000—2020年齐齐哈尔市耕地利用系统韧性的变化趋势和空间分异情况, 并基于评价结果分区, 通过分析各等级区的优劣势和障碍因子, 提出针对性对策。【结果】①与2000年相比, 2020年耕地空间分布向东北—西南向扩张, 耕地面积减少; ②齐齐哈尔市耕地利用系统韧性水平总体上升, 但区域内部差异增大, 空间异质性强, 整体呈现“西低东高”的分布态势, 高值东移北扩; ③耕地利用系统对内外压力的应对能力明显增强, 空间分布随着农业投入重心转移而改变; ④黑土地资源条件、农业投入水平和农业生产水平为制约区域耕地利用系统发展的主要障碍。【结论】齐齐哈尔市耕地利用系统韧性整体水平中等偏低、空间差异大, 各等级区的制约因素和发展方向各不相同, 应根据各区韧性现状和障碍因子, 针对性进行黑土地保护与治理。研究结果可为黑土地可持续利用和保障粮食安全提供理论支撑与实践指导。

关键词: 耕地利用系统; 韧性; 粮食供应安全; PSR (Pressure-State-Response) 模型; 东北黑土区

DOI: 10.18402/resci.2023.09.08

1 引言

粮食安全是国家安全的重要基础。东北地区作为中国最大的商品粮生产基地, 粮食产量占全国的1/4、调出量占全国的1/3, 承担着保障粮食供应、解决温饱需求的重任; 东北黑土区土壤肥力高、粮食生产能力强, 依靠黑土地资源, 年粮食产量可供超过2.16亿居民的粮食需求^[1], 是东北地区成为中国粮食安全压舱石的关键^[2], 对粮食产业链供给侧稳定有重要作用。但随着黑土地开发利用强度

日益增大^[3], 加上水蚀、风蚀等自然力作用, 黑土地出现“变薄、变瘦、变硬”和地力下降等问题。20世纪50年代至今, 东北地区黑土平均厚度下降40 cm, 黑土层有机质含量平均下降30%^[4,5]。同时, 气候变暖、自然灾害、人类活动等也对黑土地提出了挑战^[6-8]。种种扰动和冲击带来黑土地数量和质量的改变, 严重威胁国家粮食安全。因此, 研究东北黑土区的耕地韧性, 对实现耕地可持续利用、保障稳定粮食供应具有重要意义。

收稿日期: 2023-05-19 修订日期: 2023-08-22

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA28130300)。

作者简介: 苗欣然, 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要从事自然资源利用与资源经济方面研究。E-mail: miaoxinran21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 李泽红, 男, 湖北天门人, 副研究员, 主要从事区域生态经济与资源经济方面的研究。E-mail: lizehong@igsrr.ac.cn

为保护黑土地、维护国家粮食安全,学者们从不同的角度出发,对东北黑土区的黑土地可持续利用进行研究:①关于东北黑土区典型区域的研究。东北黑土区涉及黑龙江、吉林、辽宁东北部及内蒙古自治区“东四盟”,共246个县(市、旗),学者们常选取具有代表性的区域进行研究。如崔宁波等^[9]将黑土和黑钙土分布的核心区作为典型区;宋戈等^[10]以齐齐哈尔市克山县、依安县和拜泉县3个产粮大县为研究区;付晶莹等^[11]选择涵盖多种黑土类型和退化类型的齐齐哈尔市作为研究区。②关于黑土地数量、质量、生态环境的研究。如张瑞等^[2]分析了典型黑土区的耕地变化规律及驱动因素;王世豪等^[4]模拟了东北黑土地土壤侵蚀的时空变化;鲁帅等^[12]对齐齐哈尔市2001—2015年耕地生态安全的时空变化进行分析。从现有研究来看,大多是从静态视角研究耕地数量、质量、生态环境,及耕地上人类活动的差异,而未能体现耕地利用系统在动态演化过程中所具备的对变化和挑战的应对能力^[13,14]。③关于黑土地保护政策的研究。如林国栋等^[15]从政策路径、政策工具和政策评价3个角度对中国黑土地保护政策进行梳理分析;李政宏等^[16]分析了黑土地保护政策的政策强度、数量和纵横结构;何宏莲等^[17]阐释了整体系统观下“三位一体”黑土地法律保护的应然逻辑。通过学者们的分析,应因地制宜细化落实不同地区的黑土地保护方案,促进黑土地精细化管理。

在此背景下,以风险应对和适应性提升为重点^[18]的韧性理论为黑土地可持续利用和精细化管理提供了新的视角和方向。“韧性(Resilience)”强调社会-生态系统在组织协调下不断进行适应和转化,实现系统的可持续发展^[19,20]。当前,韧性的研究领域多聚焦于城市、经济、灾害与公共安全和生态环境等,探究系统在动态演化中对变化的应对能力,为系统持续发展提供对策^[20-22]。关于耕地韧性的研究尚处于起步阶段,2012年赵华甫等^[23]首次将弹性理论引入耕地系统,强调耕地系统是具有自组织特征的弹性体。近年来,关于耕地利用系统韧性的研究逐渐增多^[14,24],但目前耕地利用系统韧性的内涵仍未有相对统一的定论。从研究方法来看,韧性评价方法主要为核心变量法、综合指数法和参与式评估^[25,26],综合指数法又可分为基于韧性功能特征^[27]、基于研究对象^[28]和基于韧性发生过程^[29]的指标体系

构建方法。相对于其他领域的研究成果^[30,31],现有研究缺乏从过程视角对耕地利用系统韧性的拆分与解析。此外,韧性的研究尺度以省域^[25]、市域^[32]和县域^[33]为主,极少有研究涉及格网单元的微观尺度,难以满足耕地精细管理、分区施策的需求^[34]。

综上所述,面对系统内外的各种挑战,将韧性理论引入耕地利用系统的研究中,可为探究耕地利用系统的稳定性和抗逆性提供理论基础,也可为耕地可持续利用提供科学依据。但同时,中国耕地利用系统韧性研究尚未体系化,在概念内涵界定、研究方法、研究尺度等方面存在一定空白。本文选取具有东北黑土区典型性和代表性的齐齐哈尔市为研究区域,以黑土地保护政策提出的近20年作为时间尺度,首先进行耕地时空变化分析,而后在解析粮食供应安全下耕地利用系统韧性内涵的基础上,基于黑土地保护政策及现存问题、韧性发生过程和耕地利用系统组成构建研究框架和指标体系,在格网尺度上分析黑土区耕地利用系统韧性时空演变,并对不同韧性等级区的优势、劣势和障碍因子进行识别与诊断,旨在揭示研究区耕地利用系统韧性的变化规律和制约因素,为黑土地可持续利用与粮食供应安全提供科学参考。

2 研究框架

稳定、可持续的耕地利用系统是社会-生态大系统有序运转的保障^[35]。本文从黑土区耕地利用系统组成、韧性发生过程和PSR模型与耕地利用系统韧性相适应3个方面,解析粮食安全下黑土区耕地利用系统韧性的概念内涵,进而构建耕地利用系统韧性的研究框架。

耕地利用系统是自然-人工复合系统,由以耕地资源及相关农业设施为主的生态系统和以人类活动为主的社会经济系统组成,二者相互影响、相互作用,并不断与外界环境交互,进行自我调节与动态变化,具有自组织特征^[36,37]。结合上述研究,本文将黑土区耕地利用系统定义为黑土地自然生态子系统和人类社会经济子系统耦合的综合系统。黑土地的立地条件、土壤、气候、水文、生物多样性等自然要素和人工修建的道路、田坎、沟渠等配套农业设施组成了黑土地自然生态子系统;作用于耕地的开发利用、粮食生产等人类活动以及农业从业人员、农资、资金、技术等投入则构成了人类社会经

2023年9月

济子系统。

耕地利用系统韧性反映了经历扰动后黑土地自然生态子系统和人类社会经济子系统通过相互耦合作用而呈现出的各种能力,是耕地利用系统保持结构和功能稳定的重要特性^[13]。事实上,韧性的发生是系统不断提高适应能力的动态过程,扰动产生并作用于系统后,系统面对扰动呈现出“实时”状态,当察觉压力和状态变化后系统对扰动做出相应的举措,促使系统恢复平稳状态或转向另一平稳状态。由此,韧性的过程属性与PSR模型“压力-状态-响应”的思维逻辑相适应。已有研究成果证明,PSR模型可对韧性发生过程做出阐释^[29,30,38]。同时,PSR模型中的状态层可反映系统的稳定性,响应层可反映系统的适应转变能力,体现了韧性功能特征^[31]。因此,PSR模型可作为现有耕地利用系统韧性评价框架的补充,将韧性功能特征、耕地利用系统组成和韧性发生过程相联系,在一定程度上弥补了现有研究框架忽略韧性过程属性的不足,有利于深化对耕地利用系统韧性的理解、促进耕地利用系统的可持续管理。综上,本文围绕韧性过程属性和PSR模型对耕地利用系统韧性进行解析。

在PSR模型中,压力层、状态层和响应层可分别对应韧性发生过程中“扰动源的产生”“扰动中的状态”和“扰动后期的举措”^[13,31]。扰动源对系统产生的压力,是指外界环境对耕地利用系统的冲击和耕地利用系统内生问题的扰动。以自然灾害为代

表的外界环境压力、水土流失等黑土地自然生态子系统的内部扰动以及人类社会经济子系统中的人类活动影响共同形成了“扰动源”,作用于耕地利用系统。压力产生的可能性越大,对系统稳定性的威胁越大,对系统响应能力的要求越高。扰动中的状态,即耕地利用系统在正常运行时因受到压力而产生的系统构成要素的现状变化,是系统承受压力的能力。当压力作用于耕地利用系统时,黑土地自然生态子系统和人类社会经济子系统的稳定性受到威胁,主要表现为黑土资源和基础设施支撑能力的变化及其带来的农业情况波动。系统面对压力时的状态越好,意味着系统承受压力的能力越强、稳定性越高,其结构和功能不易被破坏。扰动后的响应,即耕地利用系统感知到压力产生及作用时,为抵御压力冲击、维持系统正常运转,而采取的有效措施,是系统主动增强稳定性,改善、调节系统结构,适应压力的过程,包括自然生态的调节和政策指导下的资金科技投入。同时,耕地利用系统对压力的响应,直接作用于黑土地自然生态子系统和人类社会经济子系统,带来黑土地条件的改善和农业生产水平的提高(图1)。

综上所述,在前人研究的基础上^[37,39],本文将粮食供应安全下黑土区耕地利用系统韧性定义为当内外扰动产生时,系统通过黑土地自然生态子系统和人类社会经济子系统的耦合调节,展现出的应对能力,包括抵御、适应和转变,同时保持系统粮食生

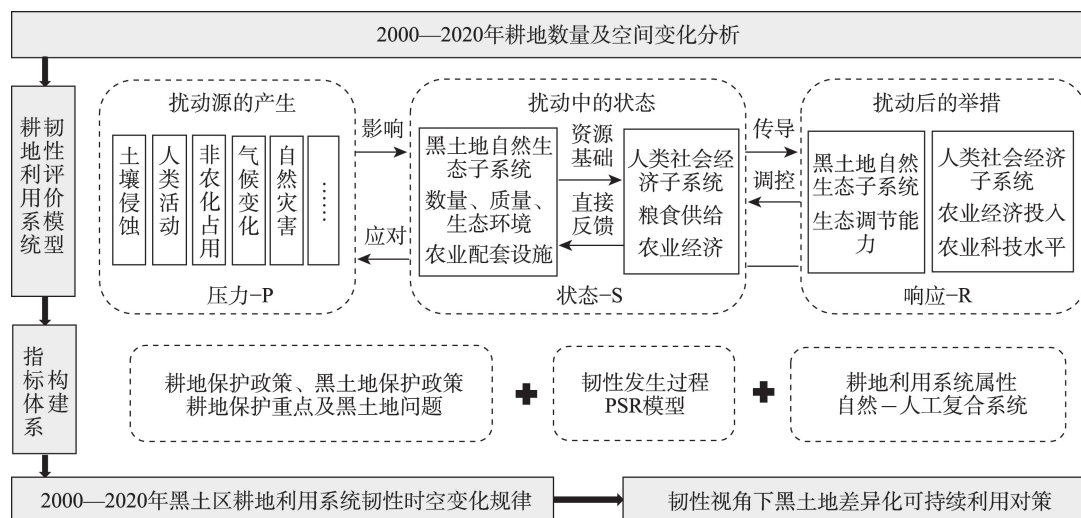


图1 研究框架示意图

Figure 1 Schematic diagram of the research framework

产功能和结构的稳定。

3 研究区概况、数据来源与研究方法

3.1 研究区概况

齐齐哈尔市位于黑龙江省西部,地处松嫩平原腹地,辖区面积约为4.23万 km^2 ,是黑龙江省第二大中心城市(图2)。耕地面积约占整个区域的57%,地貌以平原为主,日照充足,雨热同期,嫩江穿过其中部地区。同时,齐齐哈尔土壤肥沃,区域近20%为典型黑土耕地,面积约为7720 km^2 ^[11]。但经过长期的不合理耕作和自然因素影响,该市的黑土地出现土层变薄、肥力降低等问题,对粮食供应安全和区域可持续发展产生威胁。

齐齐哈尔市作为典型东北黑土区,持续稳居全国地市级产粮第一方阵,是中国重要的商品粮生产基地之一^[40],承担全国近1/50的粮食产量。在自然条件方面,齐齐哈尔跨越多个积温带,降雨、地形地貌等均呈现较强的空间分异特征。在黑土资源方面,齐齐哈尔覆盖多种黑土类型,同时亦存在土壤侵蚀、风沙土、盐碱化等多种黑土问题。综上,无论是粮食供应保障、自然资源空间分布还是黑土地保护与利用,齐齐哈尔都极具典型性与代表性。因此,本文选择齐齐哈尔市作为研究区域,试图为科学治理黑土地、保障粮食供应安全提供参考。

3.2 数据来源

本文研究涉及到的数据包括土地利用数据、土壤性质数据、气象数据、DEM数据、各级行政区划数

据等地理信息数据和社会经济统计数据,数据来源如表1所示。其中,土地利用数据来源于中国逐年土地覆盖数据集(30 $\text{m} \times 30\text{m}$),经对比,总体精度达80%^[41]。在本文中,土壤性质数据包括土壤水分、土壤厚度、土壤有机碳含量;气象数据包括逐月降雨量数据和逐月潜在蒸散发数据。

本文的前期数据处理工作主要包括研究区格网化、空间数据格网化以及社会经济数据空间化。格网尺度相比行政区划尺度更加细化,所反映的信息更加精确,同时在格网尺度进行研究可以消除区域内部行政边界的限制,有利于实现市域内的联合治理。此外,本文选取的地理信息数据多为栅格类型,需要统一尺度。结合学者们的研究^[42]和实际操作情况,本文将研究区划分为5 $\text{km} \times 5\text{km}$ 的格网,共计得到4000余个格网单元。社会经济格网化主要采取面积权重内插法和基于多源数据的回归分析方法完成。

3.3 研究方法

3.3.1 耕地变化分析

本文选用土地利用变化矩阵、重心模型和标准差椭圆对齐齐哈尔市2000—2020年的耕地数量和空间变化进行分析。

土地利用变化矩阵可直观地反映出一段时间内各类土地利用类型之间的转化,通过比较可分析出某一地类减少或增加的方向和面积变化^[43],在本文中主要突出耕地转入转出的数量与方向。

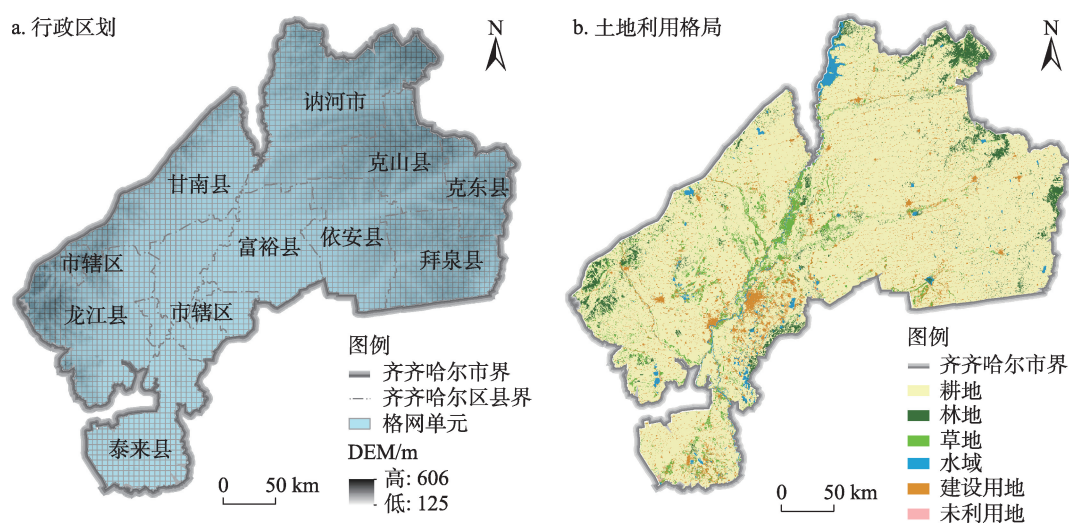


图2 齐齐哈尔行政区划(a)与土地利用格局(b)

Figure 2 Administrative division (a) and land use pattern (b) in the city of Qiqihar

2023年9月

表1 数据来源

Table 1 Data sources

数据	类型	来源
土地利用	栅格数据	中国逐年土地覆盖数据集(CLCD)
土壤性质	栅格数据	国家地球系统科学数据中心土壤分中心
DEM	栅格数据	国家地球系统科学数据共享服务平台
气象	栅格数据	国家地球系统科学数据共享服务平台— 黄土高原科学数据中心
行政区划	矢量数据	中国科学院资源环境科学数据中心
社会经济	统计数据	《齐齐哈尔市统计年鉴》(2001年、2006— 2021年)

耕地的空间重心模型以要素的某种属性作为权重,可以探究要素空间集中趋势,识别要素的地理中心^[44]。以耕地斑块的面积作为权重,借助 Arcgis 中的工具进行计算。其表达式为:

$$(A', B') = \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i A_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n w_i B_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (1)$$

式中: A' 和 B' 表示面积加权平均中心的坐标; A_i 和 B_i 表示耕地图斑 i 的坐标; w_i 表示耕地图斑 i 的权重; n 为耕地图斑的个数。

标准差椭圆作为测度要素空间分布特征的常用方法,通过椭圆面积、长轴、短轴等属性,可以识别要素分布聚集程度和主导方向,更加直观地展示耕地空间变化趋势。以耕地斑块的面积作为权重,借助 Arcgis 中的标准差椭圆工具进行计算^[45]。

3.3.2 黑土区耕地韧性多维评价指标体系构建

黑土区耕地利用系统韧性指标体系的构建,既要体现韧性的概念内涵、阐明韧性发生过程,又要展现评价对象——黑土区耕地利用系统的特殊性。因此,本文从“三位一体”黑土地保护政策及相关问题、韧性发生过程和内涵表征、耕地利用系统组成3个维度出发,构建多维评价指标体系。

新中国成立以来,耕地保护制度在探索和实践不断完善。自1981年,中国首次提出耕地保护的概念以来,中国的耕地保护经历了“数量”“数量+质量”“数量+质量+生态”的转变,现形成了数量管控、质量管理和生态管护的“三位一体”耕地保护格局^[46]。通过梳理《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》《东北黑土地保护与利用报告(2021年)》等^[47,48]有关黑土地保护的政策文件和研究成果,在

耕地数量上,中国东北黑土区耕地数量下降,主要原因是建设用地的面积占用^[49];在耕地质量上,黑土地退化主要表现在土层厚度变薄、土壤有机质含量降低和土壤蓄水能力下降^[47,48];在耕地生态环境上,东北黑土区的林地和草地面积呈减少趋势,对耕地的保育能力下降,同时化肥、农药使用和地膜覆盖给黑土地带来了土壤污染^[47,48]。此外相关研究表明,在全球气候变化的影响下,东北黑土区洪涝灾害和干旱灾害风险增强^[48]。

综上所述,本文基于PSR框架,选取了20个指标,旨在全面体现过程属性下的韧性内涵,反映东北黑土区面临的实际问题。压力层反映耕地利用系统内外的扰动和冲击,本文选取了汛期降雨量、生长季干旱指数表示外界环境带来的自然灾害风险^[50,51],坡度表示耕地土壤侵蚀风险^[4,48],建设用地占用耕地数量表示人类活动对耕地数量的影响,而化肥投入量、农药投入量和地膜覆盖量则表示农资投入对耕地质量的影响。状态层是在压力和响应作用下系统的状态变化,是“三位一体”耕地保护格局的直接体现。本文选取土层厚度、土壤有机碳含量和土壤水分分别表示黑土地“薄、瘦、硬”的问题,耕地斑块面积百分比表示耕地数量,植被覆盖指数表示耕地生态环境^[52],共同展现黑土资源支撑能力;路网密度则表示了农业基础设施支撑能力;粮食产量和农业总产值从社会经济层面表示黑土地粮食生产功能的稳定性。响应层反映耕地利用系统面对扰动主动采取举措的能力,本文选取景观指标中的景观均匀度、耕地加权平均形状斑块指数、斑块结合度指数表示耕地生态调节能力^[53,54],农业财政支出、农业机械总动力表示政策指导下政府对韧性提高的经济投入与技术投入,以改善系统状态,在扰动下寻求长期发展。同时,为避免所选指标受政策、需求等影响波动幅度过大,难以准确反映20年来耕地利用系统韧性的变化,本文对可能受到影响的齐齐哈尔社会经济数据进行了长时间序列检测,结果表明本文所选取的社会经济指标在20年间均大致呈现上升趋势,近几年保持持续上升或波动平缓,可在一定程度上反映韧性的时期变化(图3)。

结合指标选取的科学性、完整性、可行性、可获

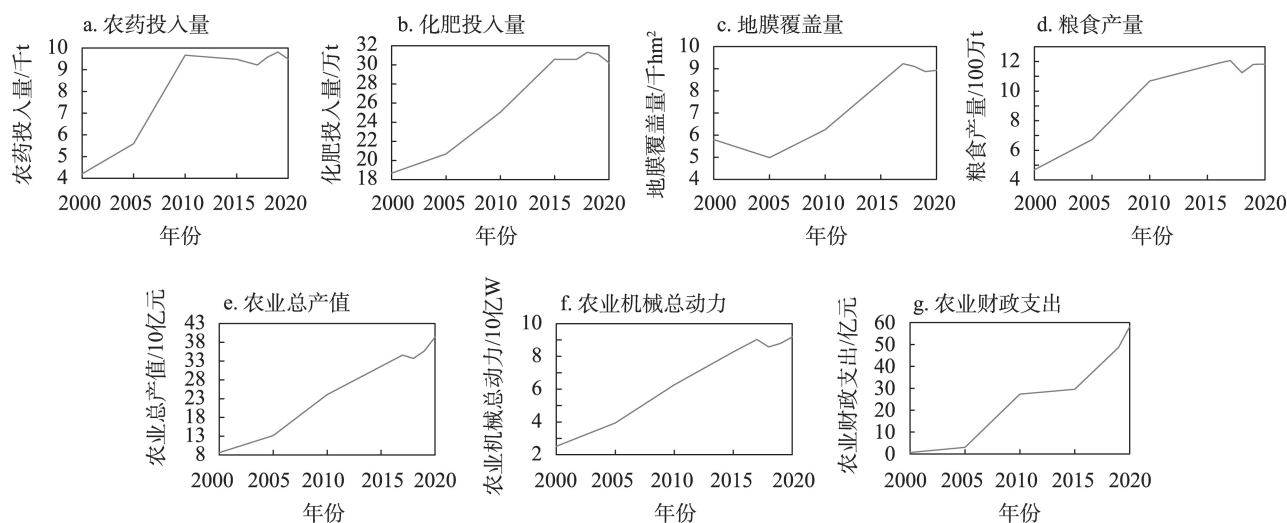


图3 2000—2020年社会经济指标变化趋势示意图

Figure 3 Trends of selected socioeconomic indicators, 2000-2020

取原则,本文构建的耕地利用系统韧性评价指标体系见表2。

3.3.3 评价指标标准化与权重确定

为了统一量纲,避免单位不同和数量级不同对研究结果造成的影响,本文采用极差标准化对指标数据进行标准化处理,具体公式如下:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (2)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{i,\max} - x_{ij}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个格网单元标准化前的数值; $x_{i,\max}$ 和 $x_{i,\min}$ 分别为第 i 个指标的最大值和最小值; x'_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个格网单元标准化后的数值。

在确定指标权重时,主客观权重相结合的方法既能根据专家经验凸显关键评价指标,又能在一定程度上保证权重的科学与客观^[55]。本文采用层次分析法进行主观赋权^[56],根据专家问卷调查规范,需找到5~7名专业领域的专家进行调查^[57]。通过向中国科学院地理科学与资源研究所等科研院所从事东北黑土地及土地资源管理方面研究的学者发放调查问卷6份,根据专家经验确定各指标和因素层的权重,各判断矩阵的一致性均通过检验。在客观赋权法中,本文选取主成分分析法^[58],经检验指标数据

KMO值大于0.7、Bartlett球形度检验结果显著,主成分分析法适宜且有效,进而通过主成分的特征根、方差解释率和各指标在主成分中的载荷系数,计算各指标的权重。通过主、客观权重同等权重加权得到综合权重,权重结果如表2所示。

3.3.4 基于指标偏离度的障碍度模型

障碍度模型可计算各评价指标的障碍度,找出限制系统发展的关键因素,从而更具针对性地提出对策建议^[59]。本文引入因子贡献度 k_i 、指标偏离度 R_{ij} 和障碍度 Z_i 3个指标,分别计算4个韧性等级区各指标的障碍度,具体公式如下:

$$Z_i = \frac{R_{ij} \times k_i}{\sum_{i=1}^n R_{ij} \times k_i} \quad (4)$$

$$R_{ij} = 1 - x'_{ij} \quad (5)$$

式中:因子贡献度 k_i 为指标权重; R_{ij} 为指标 i 的偏离度; Z_i 为指标 i 的障碍度; x'_{ij} 为指标标准化处理的结果。

同时,为更清晰地展现韧性视角下各要素对耕地利用系统的影响,本文根据指标属性和韧性内涵对指标进行归类(表2),共分为外界环境扰动、人类活动压力、立地条件限制、黑土资源支撑能力、基础设施支撑能力、功能稳定性、生态调节能力和适应转变能力8类。

表2 耕地利用系统韧性评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system of cultivated land use system resilience					
目标层	因素层	指标层(权重)	指标说明	指标属性	韧性内涵表征
耕地利用系统韧性	压力	汛期降雨量/mm(0.0363)	洪涝灾害的主要致灾因子	外界环境	外界环境扰动
		生长季干旱指数(0.0365)	植被生长季潜在蒸散发量/降雨量, 农业干旱的主要致灾因子		
		坡度/°(0.0425)	坡度越大,土壤侵蚀风险越高	黑土地自然生态子系统	耕地利用系统内生问题
		建设用地占用耕地/m ² (0.0272)	1990—2000年和2000—2010年建设用地转向耕地的面积,反映人类活动对耕地数量的影响	人类社会经济子系统	
		化肥投入量/t(0.0439)	过量农资投入导致耕地质量下降、		
		农药投入量/t(0.0485)	耕地生态环境受损		
	状态	地膜覆盖量/hm ² (0.0430)			
		耕地斑块面积百分比(0.0482)	反映耕地数量	黑土地自然生态子系统	黑土资源支撑能力
		土层厚度/cm(0.0846)	反映耕地质量,黑土地“变薄”		
		土壤有机碳含量/(g/kg)(0.0739)	反映耕地质量,黑土地“变瘦”		
		土壤水分/(m ³ /m ³)(0.0616)	反映耕地质量,黑土地“变硬”		
		植被覆盖指数(0.0356)	反映耕地生态环境,林地面积与草地面积之和占区域面积的比例		
	响应	路网密度/(km/km ²)(0.0239)	反映农业配套基础设施建设水平		基础设施支撑能力
		粮食产量/万t(0.0616)	耕地利用系统粮食供应能力	人类社会经济子系统	耕地利用系统
		农业总产值/万元(0.0548)	耕地生产的经济效益		功能稳定性
		景观均匀度(0.0519)	均匀度越强,景观类型分布越均匀,子系统调节能力越强	黑土地自然生态子系统	耕地利用系统生态调节能力
		耕地加权平均形状斑块指数(0.0391)	斑块形状越复杂,与周围交换物质信息能力越强,系统调节能力越强		
		斑块结合度指数(0.0515)	聚合度越高,对扰动的应对能力越强,系统调节能力越强		
		农业财政支出/万元(0.0719)	政府为发展农业支出的资金水平,反映对韧性提高的经济投入	人类社会经济子系统	政策指导下耕地利用系统的适应转变能力
		农业机械总动力/10 ⁴ kW(0.0660)	耕作机械水平,反映区域内的农业科技水平		

4 结果与分析

4.1 齐齐哈尔市耕地变化分析

2000—2020年齐齐哈尔市耕地变化的结果如图4所示。从耕地数量来看,与2000年相比,2020年耕地面积减少1036.85 km²,减少的面积主要集中在齐齐哈尔市北部和中南部。从耕地空间分布来看,2000年和2020年耕地标准差椭圆长短轴有较明显的差异,表明耕地分布有明显的方向性,呈东北—西南向分布;与2000年相比,2020年耕地标准差椭圆的长轴有所增加,表明耕地空间分布格局呈西北—东南向基本不变、东北—西南向扩张的趋势;此外,耕地分布重心向西南方向略有偏移,表明相比2000年,2020年西南方向的耕地面积相对增加。

2000—2020年大部分耕地空间分布未发生变化,耕地的转入转出斑块细碎,集中在齐齐哈尔中部地势低平的区域和北部、西部地势较高的区域。由土地利用转移矩阵可知(表3),非耕地向耕地转换的面积为1450.95 km²,草地位居转换面积首位,表明随着社会发展,粮食需求不断增长,草地成为补充耕地的主要来源;由耕地向非耕地转换的面积为2487.80 km²,主要去向为草地、建设用地和林地。由此,齐齐哈尔市的耕地变化规律与大部分地区相同,即在退耕还林还草政策的基础上,占用耕地进行城市建设,同时消耗草地和林地开发耕地^[60,61]。

4.2 齐齐哈尔市耕地利用系统韧性时空演变特征

由图5可知,2000—2020年齐齐哈尔市的耕地

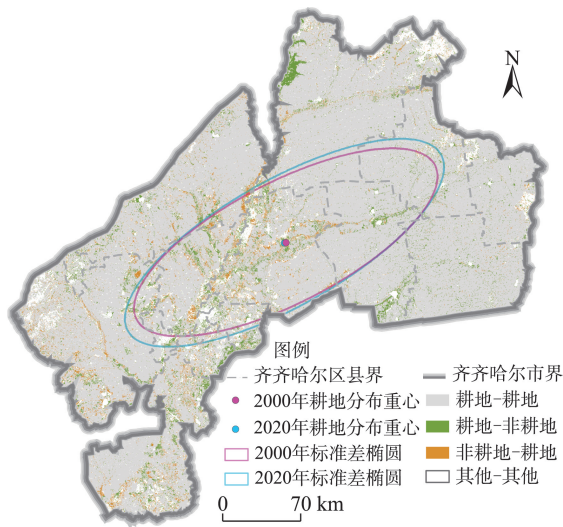


图4 2000—2020年齐齐哈尔耕地空间变化图

Figure 4 Spatial changes in cultivated land in Qiqihar, 2000–2020

利用系统韧性呈上升趋势,得分均值由2000年的47.37提升至2020年的51.33,最小值和最大值也有一定的提升,表明20年间齐齐哈尔市耕地利用系统应对内外压力、保持粮食生产结构和功能稳定的能力增强。根据齐齐哈尔年鉴的统计数据,粮食产量、农业总产值、农业机械总动力和农业财政支出在20年间均呈现上升趋势。这说明,自1998年黑土地保护政策推行以来,技术、资金在耕地上的投入均有提高。同时,2000—2020年耕地利用系统韧性得分方差由4.35增加至8.24,说明20年间齐齐哈尔市内部各区域的耕地利用系统韧性差异扩大,区域耕地利用系统发展差距增加。此外,虽然根据测度结果2000—2020年耕地利用系统韧性得分上升,但2020年齐齐哈尔市整体得分仍处于中等偏低的水平,在未来有较大的提升空间。

从2000—2020年齐齐哈尔市耕地利用系统韧

性得分空间分布格局来看(图5),齐齐哈尔市耕地利用系统韧性空间异质性显著,整体呈现出“西低东高”的分布特征,这与东部地貌形态单一、土层厚、土壤有机质高密切相关。与东部相比,齐齐哈尔西部地貌复杂多样,以薄层黑土为主,“破皮黄”区域多,再加上风力大、降雨量偏低,易发生风蚀^[4]和干旱,导致耕地质量明显低于东部。从区域高值分布来看,2000年耕地利用系统韧性高值分布在中部平原区与东部台地区,2020年耕地利用系统韧性高值向东部和北部偏移,集中在嫩江东部的低海拔台地区,这是自然条件和社会经济共同作用的结果。中部区域地处嫩江平原,地势平坦,易受暴雨洪涝灾害的影响,20年间此区域的降水明显增加,加上粗放开发利用造成的土壤有机质降低,导致中部区域的高值减少。此外,高值向东偏移还得益于农业投入的重心转移。2000年齐齐哈尔市经济发展水平整体较低,农业生产的资金与技术投入主要集中在经济相对优越的中部地区,经过20年的发展,齐齐哈尔市经济水平有了较大的提高,中部地区主要进行城市建设与发展,农业投入转向在耕地资源优越的东部,韧性高值随之偏移。

4.3 齐齐哈尔市耕地利用系统韧性PSR子系统时空演变特征

2000—2020年齐齐哈尔市耕地利用系统韧性各因素层得分如表4所示。从各因素层得分均值来看,压力层均值最高、响应层均值最低,表明系统内外造成的扰动和冲击相对较小,面对压力系统的调节、适应、转变能力仍有很大的上升空间。与2000年相比,2020年状态层和响应层得分均值均有增加,其中响应层增加的幅度最大,压力层得分减少。说明随着社会发展,在耕地上投入农资、

表3 2000—2020年齐齐哈尔市土地利用转移矩阵 (km²)

Table 3 Land use transfer matrix in Qiqihar, 2000–2020 (km²)

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计	减少
耕地	33798.96	675.26	961.23	247.97	598.95	4.40	36286.76	2487.80
林地	174.04	1040.97	16.67	4.15	3.03	0.00	1238.86	197.89
草地	1224.36	89.90	1055.52	43.69	166.22	12.94	2592.63	1537.11
水域	40.37	14.15	5.94	330.91	26.35	2.41	420.13	89.23
建设用地	5.40	0.11	0.58	49.93	1622.63	0.16	1678.81	56.18
未利用地	6.78	0.17	12.04	6.00	7.02	11.08	43.09	32.02
总计	35249.91	1820.57	2051.99	682.65	2424.19	30.98	42260.29	
新增	1450.95	779.60	996.47	351.74	801.56	19.90		

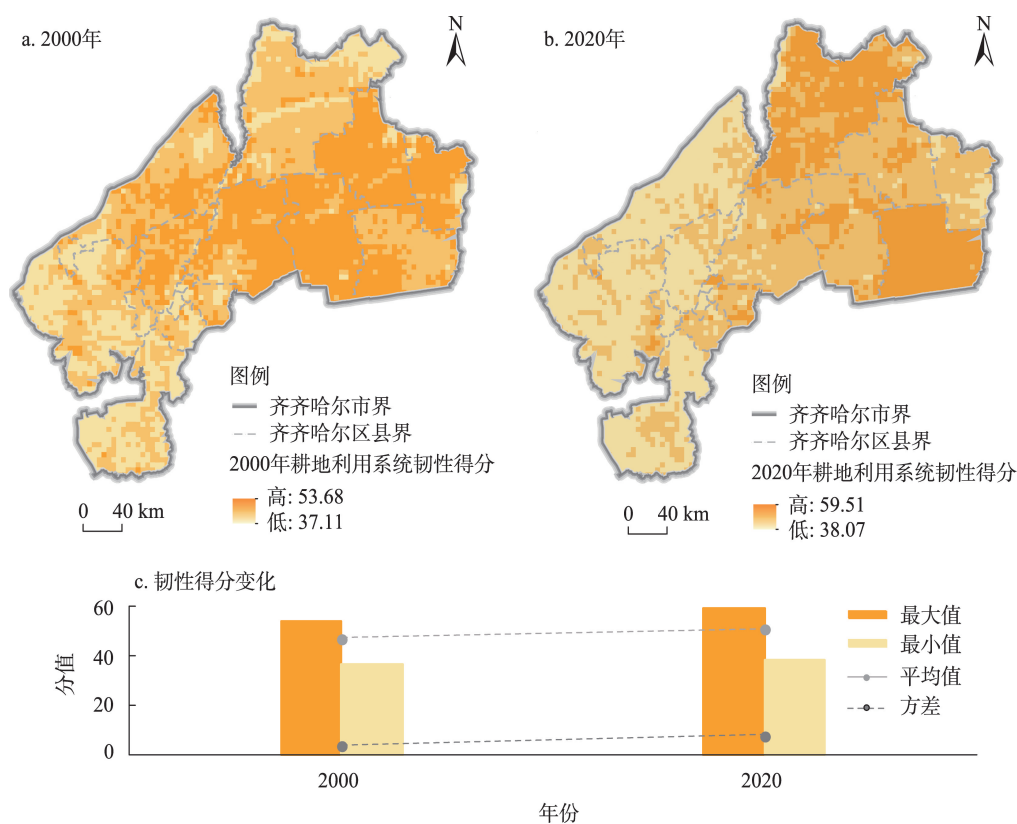


图5 2000—2020年齐齐哈尔耕地利用系统韧性时空演变

Figure 5 Spatial and temporal changes of cultivated land use system resilience in Qiqihar, 2000–2020

表4 2000—2020年齐齐哈尔耕地利用系统韧性因素层得分情况

Table 4 Resilience factor scores of cultivated land use system in Qiqihar, 2000–2020

	压力		状态		响应	
	2000年	2020年	2000年	2020年	2000年	2020年
最大值	25.12	24.93	23.01	26.98	12.07	16.56
最小值	16.30	12.87	6.43	2.62	5.18	6.93
均值	22.53	20.60	18.22	20.11	6.62	10.62
方差	1.09	2.41	5.85	8.89	1.23	2.74

农机的力度加大,人类对耕地利用系统的调控使系统面对压力的适应转变能力增强。同时,20年来黑土地保护政策的推行使耕地质量和生态环境得到一定的改善,部分地区土壤有机质增加;通过防护林等工程建设,将近一半的区域植被覆盖指数和景观均匀度提高,进而增强了耕地利用系统的自我调节能力。但20年间对粮食的供应需求不断扩大,导致化肥、农药、地膜的使用量持续提高,近年来虽上升幅度减缓,但仍保持在较高水平。再加上因城市建设占用的耕地面积增加^[49]、气候变化导致的自然灾害风险加剧^[48],使得耕地利用系统面临的压力增

加,对耕地利用系统的结构和功能的稳定产生较大威胁。从各因素层得分的方差来看,2000—2020年方差呈增加趋势,说明无论是耕地利用系统面临的内外扰动、压力和响应作用下系统的稳定性还是系统的应对能力均在区域内部差异扩大。

图6呈现了齐齐哈尔市2000—2020年各因素层得分的空间分布格局。从压力层来看,2000—2020年的空间分布呈现较强的异质性,且格局未发生较大变化,得分均由中部地区向四周逐渐降低。相对于地势平坦的中部地区,其他地区,或是位于东部、西部坡度较大的丘陵区,或是位于降雨量与

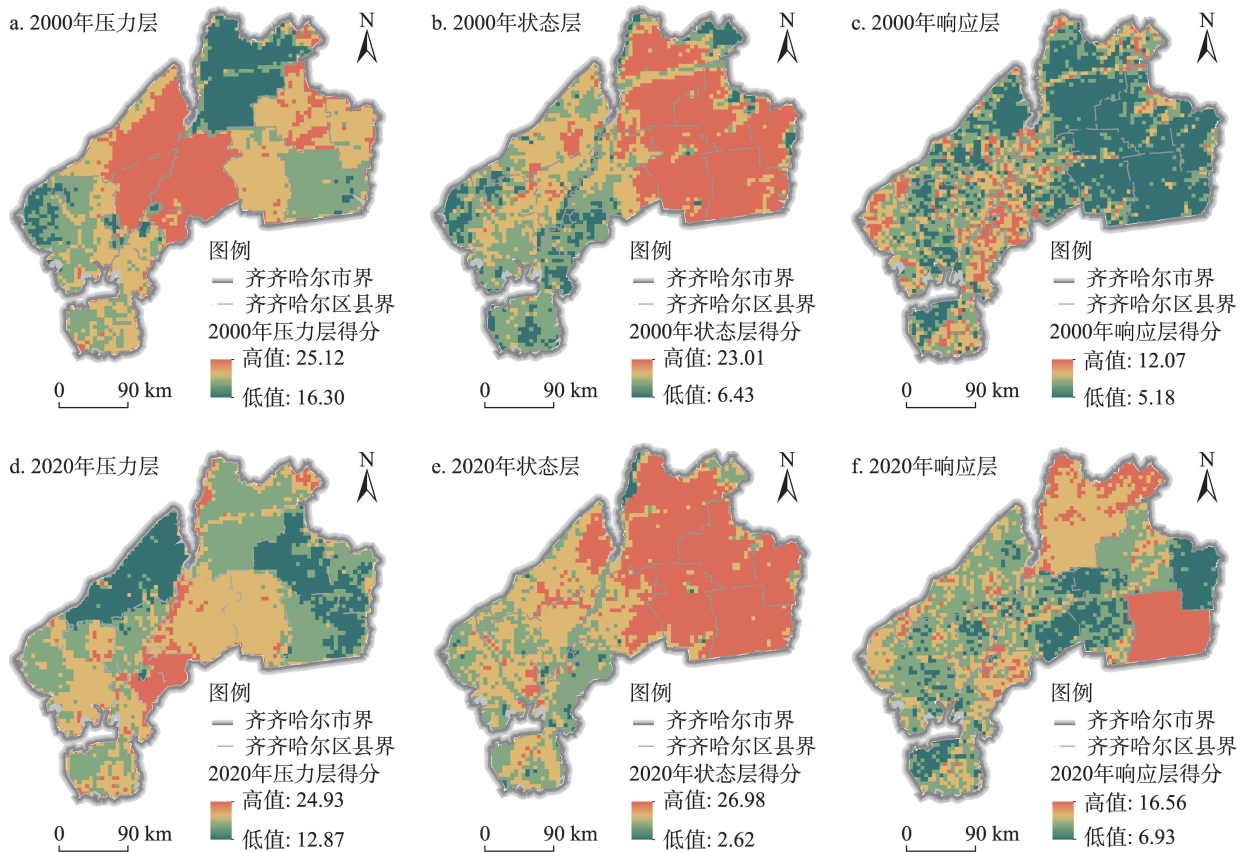


图6 2000—2020年耕地利用系统韧性因素层时空演变

Figure 6 Spatial and temporal changes of resilience factors of cultivated land use system, 2000–2020

蒸发量不平衡的东北部易涝区、西南部易旱区,导致土壤侵蚀、自然灾害;或是受粮食需求的影响,耕地面积扩张,化肥、农药、地膜投入强度高,对耕地利用系统造成扰动和冲击,造成系统压力值相对较高。20年间,状态层得分的空间格局也未发生明显变化,基本呈现出“西低东高”的分布格局,高值集中在嫩江东部、讷谟尔河和乌裕尔河周围,以黑土和黑钙土分布为主,具有相对优越的耕地质量和生态环境条件,黑土资源支撑能力保障了耕地利用系统结构和功能的稳定。2000—2020年响应层的空间格局变化相对显著,这与农业投入重心的变化相关,根据相关规划和政策引导,农业投入由中部转向以主粮种植和农业发展为主的东北部和东南部。同时,位于嫩江生态带、讷谟尔河等河流生态轴、以及东、西部生态屏障的区域,耕地利用系统的响应能力相对更强。这是由于区域内部有耕地、草地、林地、河流等多种类型斑块分布,景观均匀度高、耕地与其他类型斑块的交互能力强,且植被、河

流等生态景观具有保育和调节作用,使得系统的响应能力提高。

4.4 基于韧性的黑土地可持续利用对策

利用自然断点法将2020年的耕地利用系统韧性分为4类,根据韧性得分由高到低分别为一级至四级韧性区。比较各区的指标均值,可反映各等级区的优势和劣势;计算各区的指标障碍度则可诊断当前区域韧性提高的障碍因子,二者相结合以针对性提出黑土地可持续利用对策,促进区域耕地利用系统持续发展,保障粮食供应安全(图7、表5)。

一级韧性区:主要分布在齐齐哈尔市东北部和东南部。此区域黑土地资源支撑作用强,土层厚、土壤有机质含量高、土壤水分充足;同时社会经济投入力度大,系统的适应转变能力强,使得耕地利用系统韧性值高。但与其他区域相比,外界环境扰动、立地条件和生态调节能力具有明显劣势。从区域内部来看,黑土资源支撑能力和功能稳定性是制约区域韧性提高的主要原因,说明区域土壤肥力、

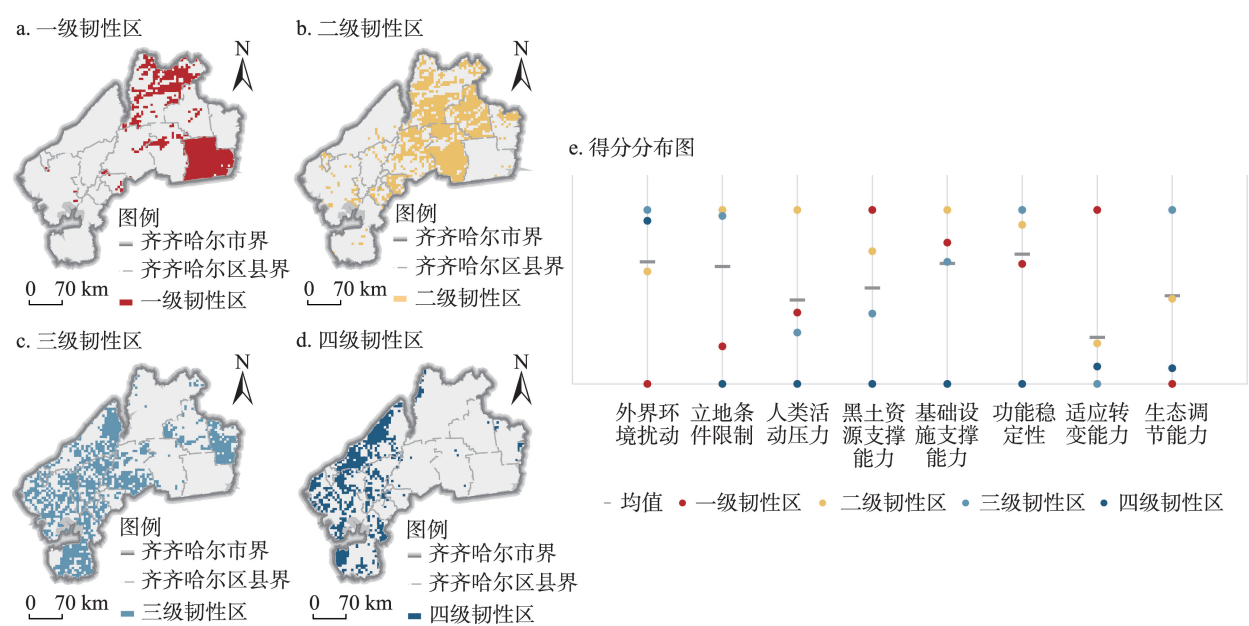


图7 耕地利用系统韧性分区(a、b、c、d)及得分分布(e)

Figure 7 Cultivated land use system resilience zoning (a; b; c; d) and score distribution (e)
注:为使等级区间分数差异更显著,右图为归一化后的得分,要素间不具有可比性

表5 各等级区障碍因子诊断 (%)

Table 5 Diagnosis of constraint factors in each resilience class (%)

	一级韧性区	二级韧性区	三级韧性区	四级韧性区
外界环境扰动	7.46	6.70	6.18	5.89
人类活动压力	8.11	7.12	7.30	7.15
立地条件限制	1.20	0.81	0.78	1.09
黑土资源支撑能力	21.72	23.13	25.77	28.63
基础设施支撑能力	5.27	4.94	4.68	4.46
功能稳定性	21.73	20.28	19.12	18.68
生态调节能力	17.23	15.97	14.89	14.48
适应转变能力	17.27	21.05	21.28	19.63

粮食产量等仍有提升空间。因此,需在保持土壤肥力和社会经济支持不下降的基础上,减小农业灾害的压力,提升生态调节能力,以增加粮食产量、改善农业经济。此区域应采取生物和工程措施治理坡耕地上的土壤侵蚀;通过种植抗涝抗寒品种、秋整地等克服低温冷凉的劣势,应对洪涝灾害、保障粮食产量;严守生态保护红线,持续推进退耕还林、还草等政策实施,增强森林、草地对黑土地的保育功能。

二级韧性区:主要分布在齐齐哈尔市东部和中部。此区域耕地利用系统韧性较高的原因是人类活动压力小、基础设施支撑能力强和稳定的粮食生产功能,但相对于其他等级区,存在外界环境扰动

较大和农业资金、技术投入不足的问题。此外,根据障碍度模型,黑土资源支撑能力和适应转变能力是系统发展的主要障碍,提升潜力较大。因此,需加大防灾减灾力度、提高农业投入水平,保障耕地资源安全。应通过工程措施提高集水区排水能力,适当发展水稻等抗涝品种种植,减少农业灾害的影响;提升区域旱灾、涝灾等灾害的预警监测水平,及时做好灾害监控、防御等准备工作;加大机械化、现代化农业发展力度,将农业资金向此区域所在的县区、乡镇倾斜,提高农业投资水平、推广现代农机设备。

三级韧性区:主要分布在齐齐哈尔中南部、西部和东部部分区域。与其他韧性区相比,此区域的优势在于外界环境扰动小、功能较稳定、拥有良好

的生态调节能力,劣势是人类活动压力较大、适应转变能力不足。同时,除东部部分区域外,其他区域存在土层较薄、土壤有机质较低的问题,导致黑土资源支撑能力较差。通过障碍因子诊断,黑土资源支撑能力和适应转变能力亦是此区域耕地利用系统韧性发展的主要障碍。因此,应以增强系统的适应转变能力为主,同时进行土壤修复与治理,提高黑土资源支撑能力。可加大农业资金、技术投入力度,通过宅基地整治、土地流转等方式改善耕地细碎化问题,进而提高农业机械化 and 现代化水平;通过种植防风林、秸秆覆盖等防止风蚀,完善灌排工程治理土壤盐碱化和低洼处易涝问题,改善土壤质量;适量使用化肥、农药、地膜,用秸秆、粪肥等有机肥代替无机肥,促进资源循环利用、提高土壤肥力。

四级韧性区:主要分布在齐齐哈尔的西部和南部地区。此区域受外界环境扰动较小,但在系统内生问题、结构和功能稳定性和应对能力方面均具有绝对劣势,同时存在风沙土、风蚀等问题,导致耕地利用系统韧性低。根据障碍度模型结果,就区域内部而言,黑土资源支撑能力和适应转变能力是阻碍系统韧性提高的主要障碍因子。为保障粮食供应安全,此区域的首要任务是进行耕层培育,提高耕地质量,以增强黑土资源支撑能力,维持耕地利用系统的稳定性;同时科学投入,减少人类活动压力、提高适应调节能力。可通过秸秆覆盖、修建防风固沙林等减少风蚀威胁;大力推行秸秆、粪肥还田等保护性耕作技术,实行轮作、间作、休耕等方式,增加耕层厚度、改善土壤肥力,减少人类活动对耕地的压力;加大农业经济的投入力度,进行土壤修复和生态治理,改善和保护耕地生态环境。

5 结论

本文以齐齐哈尔市为例,在摸清耕地时空格局变化特征的基础上,基于过程视角探究了格网尺度下耕地利用系统韧性时空演变情况,并结合各等级区的优劣势和障碍因子提供了发展对策。主要结论如下:

(1)2000—2020年耕地空间分布格局为东北—西南向,并有向此方向继续扩张的趋势;耕地转入转出斑块细碎,草地为补充耕地的主要来源,草地、建设用地和林地是耕地转出的主要去向。与2000

年相比,2020年耕地面积减少。

(2)2000—2020年耕地利用系统韧性总体上升,但仍处于中等偏低的水平,区域内部差异逐渐增大。耕地利用系统韧性格局整体呈现出“西低东高”的分布态势,在自然生态和社会经济共同作用下高值分布呈东移北扩的特征,西部低值明显增多。

(3)2000—2020年耕地利用系统的内外压力上升,但面对压力时系统的支撑能力和稳定性有所改善、应对能力明显增强。压力层、状态层空间格局未发生较大变化,因农业投入重心转移,响应层的高值转向东部主粮种植及农业发展区。

(4)齐齐哈尔市耕地利用系统韧性提高的障碍因子主要为黑土地资源条件、农业投入水平和农业生产水平。各区发展方向不同,一级韧性区主要减少系统内外扰动,增加生态调节能力;二级韧性区需加大防灾减灾力度、提高对资金和技术投入;三级韧性区需增加农业投入强度,进行土壤修复与治理;四级韧性区侧重于进行耕层培育,提高耕地质量。

与其他研究相比,本文考虑了耕地利用系统的自组织特征和韧性过程属性,在一定程度上丰富了动态视角下耕地可持续利用研究。但耕地韧性研究仍受到一些制约,如社会经济数据空间化问题、多时点土壤数据和土地利用现状分类数据的获取问题等,有待讨论与完善。

参考文献(References):

- [1] Liu X B, Zhang S L, Zhang X Y, et al. Soil erosion control practices in Northeast China: A mini-review[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 44-48.
- [2] 张瑞, 杜国明, 张树文. 1986—2020年东北典型黑土区耕地资源时空变化及其驱动因素[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 939-950. [Zhang R, Du G M, Zhang S W. Spatiotemporal changes and the driving factors of cultivated land resources of the typical black soil region in Northeast China from 1986 to 2020[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 939-950.]
- [3] 杜国明, 梁常安, 张树文, 等. 黑土地保护的对象特性、面临形势与应对策略[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 887-899. [Du G M, Liang C A, Zhang S W, et al. The object characteristics, facing situations and countermeasures of black soil protection[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 887-899.]
- [4] 王世豪, 徐新良, 曹巍. 2000—2020年东北黑土地土壤侵蚀时空

2023年9月

- 演化特征[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 951-965. [Wang S H, Xu X L, Cao W. Spatial and temporal changes of erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2020[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 951-965.]
- [5] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全: 用好养好黑土地的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 557-564. [Liang A Z, Li L J, Zhu H. Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation: Countermeasures in conservation and rational utilization of black land[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 557-564.]
- [6] 马九杰, 崔卫杰, 朱信凯. 农业自然灾害风险对粮食综合生产能力的影响分析[J]. 农业经济问题, 2005, (4): 14-17. [Ma J J, Cui W J, Zhu X K. Impacts of natural disasters on comprehensive capacity of grain production in China: An analysis[J]. Issues in Agricultural Economy, 2005, (4): 14-17.]
- [7] 封志明. 中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障[J]. 人口研究, 2007, (2): 15-29. [Feng Z M. Future food security and arable land guarantee for population development in China[J]. Population Research, 2007, (2): 15-29.]
- [8] Viana C M, Freire D, Abrantes P, et al. Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review[J]. Science of Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150718.
- [9] 崔宁波, 王胜男. 粮食安全背景下东北典型黑土区耕地压力动态变化及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 220-230. [Cui N B, Wang S N. Dynamic change and trend analysis of cultivated land pressure in typical black soil areas of Northeast China under food security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 220-230.]
- [10] 宋戈, 张红梅. 东北典型黑土区耕地轮作休耕的空间重构[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2231-2246. [Song G, Zhang H M. Spatial reconstruction of farmland rotation and fallow in the typical black soil region of Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2231-2246.]
- [11] 付晶莹, 郜强, 江东, 等. 黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1662-1680. [Fu J Y, Gao Q, Jiang D, et al. Optimal regulation of spatial planning in the context of black soil preservation and food security in Qiqihar[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1662-1680.]
- [12] 鲁帅, 宋戈, 杨一佳. 基于改进蒙特卡罗模拟的耕地生态安全时空特征研究: 以齐齐哈尔市为例[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(4): 137-145. [Lu S, Song G, Yang Y J. Temporal and spatial characteristics of cultivated land ecological security based on improved Monte Carlo Simulation: Taking Qiqihar as an example[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 137-145.]
- [13] 李玉恒, 黄惠倩, 郭桐冰, 等. 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 Y H, Huang H Q, Guo T B, et al. 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.]
- [14] 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 L J, Huang C, Chen X, et al. Evaluation of cultivated land ecosystem resilience of Quzhou County[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1949-1958.]
- [15] 林国栋, 吕晓, 牛善栋. “政策路径-政策工具-政策评价”框架下的中国黑土地保护政策文本分析[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 900-912. [Lin G D, Lv X, Niu S D. Analysis of China's black soil protection policy text under the framework of “policy path-policy tools-policy evaluation” [J]. Resources Science, 2023, 45(5): 900-912.]
- [16] 李政宏, 吕晓, 杨伊涵, 等. 中国黑土地保护政策演进过程与特征的量化考察[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 998-1008. [Li Z H, Lv X, Yang Y H, et al. Evolution process and characteristics of protection policy for black soils in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 998-1008.]
- [17] 何宏莲, 安洋, 刘尊梅. “三位一体”黑土地法律保护的应然逻辑与实现路径[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 913-925. [He H L, An Y, Liu Z M. Normative logic and implementation of the “three aspects in one” legal protection of the black soil land[J]. Resources Science, 2023, 45(5): 913-925.]
- [18] Meuwissen M P M, Feindt P H, Spiegel A, et al. A framework to assess the resilience of farming systems[J]. Agricultural Systems, 2019, DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102656.
- [19] Urruty N, Tailliez-Lefebvre D, Huyghe C. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36(1): 1-15.
- [20] 汪辉, 徐蕴雪, 卢思琪, 等. 恢复力、弹性或韧性: 社会-生态系统及其相关研究领域“Resilience”一词翻译之辨析[J]. 国际城市规划, 2017, 32(4): 29-39. [Wang H, Xu Y X, Lu S Q, et al. A comparative study of Chinese translation of resilience terminology in socio-ecological system and its related research fields[J]. Urban Planning International, 2017, 32(4): 29-39.]
- [21] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731. [Zhao R D, Fang C L, Liu H M. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.]
- [22] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7. [Li L G, Zhang P Y, Tan J T, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 1-7.]
- [23] 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 H F, Qu X B, Feng X W, et al. The elastic deformation theory of cultivated land

- and its empirical research[J]. Areal Research and Development, 2012, 31(2): 73-77.]
- [24] Lyu X, Wang Y N, Niu S D, et al. Spatio-temporal pattern and influence mechanism of cultivated land system resilience: Case from China[J]. Land, 2022, DOI: 10.3390/land11010011.
- [25] 方叶林, 王秋月, 黄震方, 等. 中国旅游经济韧性的时空演化及影响机理研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 417-427. [Fang Y L, Wang Q Y, Huang Z F, et al. Spatial and temporal evolution of tourism economic resilience and mechanism of impact in China [J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 417-427.]
- [26] Paas W, Martín C S, Soriano B, et al. Assessing future sustainability and resilience of farming systems with a participatory method: A case study on extensive sheep farming in Huesca, Spain[J]. Ecological Indicators, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108236.
- [27] 李宸琪, 张翔, 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 C Q, Zhang Y, Fu B H, et al. Resilience evaluation and spatial difference of cultivated land system in Kunming[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 4848-4855.]
- [28] Zhang Y, Zhou D, Li Z, et al. Spatial and temporal dynamics of social-ecological resilience in Nepal from 2000 to 2015[J]. Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 2020, DOI: 10.1016/j.pce.2020.102894.
- [29] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 114-120. [Jiao L D, Deng J L, Wu Y, et al. Evaluation of urban resilience based on PSR+ cloud model[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 114-120.]
- [30] 李玉恒, 黄惠倩, 王晟业. 基于乡村经济韧性的传统农区城乡融合发展路径研究: 以河北省典型县域为例[J]. 经济地理, 2021, 41(8): 28-33. [Li Y H, Huang H Q, Wang S Y. Path of urban-rural integrated development in traditional agricultural zones based on rural economic resilience: The study of typical counties of Hebei Province[J]. Economic Geography, 2021, 41(8): 28-33.]
- [31] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估: 以湖北省黄石市为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. [Chen D Y. Urban Resilience Assessment Based on Pressure-State-Response Model: A Case Study of Huang Shi City[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.]
- [32] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang S J, Cui Z T, Lin J J, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.]
- [33] 胡霄, 李红波, 李智, 等. 河北省县城乡村韧性测度及时空演变[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(3): 89-96. [Hu X, Li H B, Li Z, et al. Measurement and spatio-temporal evolution of rural resilience at county level in Hebei Province[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(3): 89-96.]
- [34] 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. [Liu W Y, Song G, Gao J, 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, 2023, 39(9): 252-260.]
- [35] 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, (5): 16-19. [Lv X, Wang Y N, Wang B Y. Resilience theory perspective some thoughts on the use and conservation of cultivated land[J]. China Land, 2022, (5): 16-19.]
- [36] 胡月明, 杨颢, 邹润彦, 等. 耕地资源系统认知的演进与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 937-945. [Hu Y M, Yang H, Zou R Y, et al. Evolution and prospect of systematic cognition on the cultivated land resources[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 937-945.]
- [37] 杜国明, 柴璐佳, 李玉恒. 耕地利用系统的理论解析与研究框架[J]. 地理科学进展, 2022, 41(7): 1288-1299. [Du G M, Chai L J, Li Y H. Theoretical explanation and research framework of cultivated land use system[J]. Progress in Geography, 2022, 41(7): 1288-1299.]
- [38] 孙慧, 原伟鹏. 西部地区经济韧性与经济高质量发展的关系研究[J]. 区域经济评论, 2020, (5): 23-35. [Sun H, Yuan W P. A study on the relationship between economic resilience and high-quality economic development in Western China[J]. Regional Economic Review, 2020, (5): 23-35.]
- [39] Buitenhuis Y, Candel J J L, Termeer K J A M, et al. Does the common agricultural policy enhance farming systems' resilience? Applying the resilience assessment tool (ResAT) to a farming system case study in the Netherlands[J]. Journal of Rural Studies, 2020, 80: 314-327.
- [40] 陈晓红, 周宏浩, 王秀. 基于生态文明的县域环境-经济-社会耦合脆弱性与协调性研究: 以黑龙江省齐齐哈尔市为例[J]. 人文地理, 2018, 33(1): 94-101. [Chen X H, Zhou H H, Wang X. The vulnerability and coordination of the coupling of environment, economy and society in county: A case of Qiqihar City of Heilongjiang Province[J]. Human Geography, 2018, 33(1): 94-101.]
- [41] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [42] 张晓瑶, 虞虎, 张潇, 等. 基于多源数据的三江源国家公园土地生态安全综合评价[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5665-5676. [Zhang X Y, Yu H, Zhang X, et al. Comprehensive evaluation of land ecological security in the Sanjiangyuan National Park based on multi-source data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5665-5676.]
- [43] 刘卫林, 何昊, 朱圣男, 等. 1980-2015年江西省土地利用迁移变化分析及驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 361-368. [Liu W L, He H, Zhu S N, et al. Spatial and temporal variability characteristics and driving mechanisms of land use in Jiangxi Province from 1980 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conser-

2023年9月

- vation, 2023, 30(2): 361–368.]
- [44] 韩璟, 潘子纯, 卢新海. 东南亚地区中国海外耕地投资项目的空间分布及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1521–1534. [Han J, Pan Z C, Lu X H. Spatial distribution and influencing factors of China's overseas farmland investment projects in Southeast Asia[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1521–1534.]
- [45] 王胜鹏, 乔花芳, 冯娟, 等. 黄河流域旅游生态效率时空演化及其与旅游经济互动响应[J]. 经济地理, 2020, 40(5): 81–89. [Wang S P, Qiao F H, Feng J, et al. The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yellow River Basin and its interactive response with tourism economy development level[J]. Economic Geography, 2020, 40(5): 81–89.]
- [46] 王文旭, 曹银贵, 苏锐清, 等. 我国耕地保护政策研究: 基于背景、效果与未来趋势[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 40–51. [Wang W X, Cao Y G, Su R Q, et al. Cultivated land protection policy in China: Background, effect and future trends[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(10): 40–51.]
- [47] 农业部, 国家发展改革委, 财政部, 等. 东北黑土地保护规划纲要(2017–2030年)[EB/OL]. (2017–07–20) [2023–05–01]. https://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm. [Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, et al. The Outline of the Northeast Black Land Protection Plan (2017–2030)[EB/OL]. (2017–07–20) [2023–05–01]. https://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.]
- [48] 中国科学院. 中科院发布《黑土地保护与利用报告(2021年)》[EB/OL]. (2022–10–02) [2023–06–18]. https://www.cas.cn/sygz/202210/t20221002_4849787.shtml. [Chinese Academy of Sciences. CAS Releases Report on Black Soil Conservation and Utilization (2021) [EB/OL]. (2022–10–02) [2023–06–18]. https://www.cas.cn/sygz/202210/t20221002_4849787.shtml.]
- [49] 刘洪彬, 李顺婷, 吴梦瑶, 等. 耕地数量–质量–生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 544–552. [Liu H B, Li S T, Wu M Y, et al. Current situation and perspectives of black soil protection from the integrated angle of quantity, quality, and ecology in Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 544–552.]
- [50] 康蕾, 张红旗. 中国五大粮食主产区农业抗旱能力综合评价[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 481–489. [Kang L, Zhang H Q. Evaluation of agriculture drought resistance under natural drought in five grain producing areas in China[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 481–489.]
- [51] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 等. 基于AHP_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J]. 地理研究, 2020, 39(8): 1892–1906. [Liu Y Y, Wang S Q, Wang X B, et al. Flood risk assessment in Bangladesh, India and Myanmar based on the AHP weight method and entropy weight method[J]. Geographical Research, 2020, 39(8): 1892–1906.]
- [52] 刘勇, 张红, 尹京苑. 基于土地利用变化的太原市土地生态风险研究[J]. 中国土地科学, 2009, 23(1): 52–57. [Liu Y, Zhang H, Yin J Y. Study on land ecological risk in Taiyuan City based on land use change[J]. China Land Science, 2009, 23(1): 52–57.]
- [53] 周俊哲, 陈勇, 周皓, 等. 矿业城市景观生态安全研究: 一种双层复杂网络分析方法[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5817–5826. [Zhou J Z, Chen Y, Zhou H. The landscape ecological security of a mining city: A two-layer complex network analysis method[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5817–5826.]
- [54] 刘艳芳, 安睿, 曲胜秋, 等. 福建省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(11): 121–132. [Liu Y F, An R, Qu S Q, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis of the cultivated land in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(11): 121–132.]
- [55] 陈晓雨婧, 吴燕红, 夏建新. 甘肃省资源环境承载力监测预警[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2378–2388. [Chen X Y J, Wu Y H, Xia J X. Dynamic monitoring and early warning of resources and environment carrying capacity in Gansu, China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2378–2388.]
- [56] Saaty, T L. Modeling unstructured decision problems: The theory of analytical hierarchies[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1978, 20(3): 147–158.
- [57] Marlin D, Lamont B T, Hoffman J J. Choice situation, strategy, and performance: A reexamination[J]. Strategic Management Journal, 1994, 15(3): 229–239.
- [58] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1299–1307. [Ma L, Jin F J, Liu Y. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1299–1307.]
- [59] 杨华, 芮旸, 李炬霖, 等. 陕西省农业现代化水平时空特征及障碍因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 172–183. [Yang H, Rui Y, Li J L, et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 172–183.]
- [60] 许丽丽, 李宝林, 袁焯城, 等. 2000–2010年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析[J]. 资源科学, 2015, 37(8): 1543–1551. [Xu L L, Li B L, Yuan Y C, et al. Changes in China's cultivated land and the evaluation of land requisition–compensation balance policy from 2000 to 2010[J]. Resources Science, 2015, 37(8): 1543–1551.]
- [61] 李世捷, 陈晋, 揭娜, 等. 基于GlobeLand30的中国耕地占补平衡评价方法研究[J]. 地理信息世界, 2022, 29(5): 74–80. [Li S J, Chen J, Jie N, et al. A new evaluation method of requisition–compensation balance of farmland in China based on GlobeLand30[J]. Journal of Spatio-temporal Information, 2022, 29(5): 74–80.]

Spatiotemporal changes of cultivated land use system resilience in the black soil region of Northeast China under food supply security: A case study of Qiqihar City

MIAO Xinran^{1,2}, LI Zehong^{1,2}, WANG Mengyuan^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to analyze the connotation of cultivated land use system resilience under food supply security based on the self-organization characteristics of cultivated land use system and the attributes of the resilience process, reveal the spatial-temporal changes and constraints of cultivated land use system resilience in the black soil region, and provide countermeasures for the sustainable use of black soil resources. [Methods] Taking Qiqihar City as the research area and based on an examination of the spatial and temporal changes of cultivated land, this study established a cultivated land use resilience evaluation indicator system around black soil conservation policies and related issues, analyzed the resilience processes and connotation characterization, identified the composition of cultivated land use systems, and used the pressure-state-response (PSR) model to evaluate resilience at the grid scale. It further analyzed the trend of change and spatial variation of cultivated land use system resilience in Qiqihar from 2000 to 2020. Based on the evaluation results, we proposed targeted countermeasures by analyzing the strengths and weaknesses and constraint factors of each resilience class. [Results] (1) Compared to 2000, the spatial distribution of cultivated land expanded in a northeast-southwest direction in 2020, with a decrease in the total area of cultivated land. (2) The overall level of resilience of Qiqihar's cultivated land use system increased, but the intraregional variation also increased, and the spatial heterogeneity was strong, showing a distribution pattern of "low in the west and high in the east". The high value areas moved to the east and expanded to the north. (3) The ability of the cultivated land use system to cope with internal and external pressures was significantly enhanced, and the spatial distribution changed with the shift of the agricultural input center. (4) The conditions of the black soil resources, the level of agricultural inputs, and the level of agricultural production were the main constraints to the development of the black soil cultivated land use system. [Conclusion] The overall level of cultivated land use system resilience in Qiqihar was moderately low and spatially varied, and the constraints and development directions of each resilience class differed, therefore black soil conservation and management should be targeted according to the current status of resilience and obstacle factors in each district. The results of this study can provide some theoretical support and practical guidance for the sustainable use of black soil resources and safeguarding food security.

Key words: cultivated land use system; resilience; food supply security; PSR (Pressure-State-Response) model; black soil in Northeast China