

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.038.

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.

东北黑土区典型县域耕地质量对耕地水田化的空间响应

张 慧, 栾思雨, 丛 蓉

(东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150000)

摘 要: [目的] 耕地水田化过程对耕地质量具有至关重要的影响, 明确东北黑土区耕地质量对耕地水田化的空间响应, 是提升黑土耕地质量实现耕地可持续利用的重要前提。[方法] 构建 LESA 耕地质量评价体系, 采用 CRITIC 模型、双变量局部空间自相关模型, 揭示耕地质量和耕地利用变化之间的空间响应关系。[结果] (1) 研究区耕地水田化现象剧烈, 呈现出东部最强、西部次之、中部最弱的时空分异格局; (2) 研究区耕地质量变化显著, 耕地质量下降比例低于质量提升比例, 表现出中部下降最高、西部下降次高、东部下降最低的时空格局; (3) 研究区耕地质量对水田化的响应具有双重效应, 负向响应更为敏感, 整体呈现出东部耕地质量响应程度高于其他区域的空间格局。[结论] 研究区耕地水田化对耕地质量具有正、负两种效应, 依据效应方向进行耕地利用结构调整, 是保护黑土耕地的重要途径。对于具有正向效应的区域应适度推进旱改水项目, 而针对具有负向效应的区域应停止旱改水工程, 积极进行水田休耕, 并可适当地将其恢复为旱地。

关键词: 耕地质量; 耕地水田化; CRITIC 模型; 双变量局部空间自相关; 黑土区; 富锦市

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0327-08

Spatial Response of Cultivated Land Quality to Paddy Farming in Typical Counties of Northeast Black Soil Region

Zhang Hui, Luan Siyu, Cong Rong

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: [Objective] The process of paddy field of cultivated land has a crucial impact on the quality of cultivated land. To clarify the spatial response of cultivated land quality to paddy field of cultivated land in north-east black soil area is an important prerequisite for improving the quality of black soil cultivated land and realizing the sustainable use of cultivated land. [Methods] LESA cultivated land quality evaluation system, CRITIC model and bivariate local spatial autocorrelation model were used. [Results] (1) The phenomenon of paddy field of cultivated land in the study area was intense, showing the strongest spatial and temporal pattern in the east, followed by the west, and the weakest in the middle. (2) The quality of cultivated land in the study area had changed significantly, and the proportion of decline in cultivated land quality was lower than the proportion of quality improvement, showing a spatiotemporal pattern of the highest decline in the middle, the second highest decline in the west, and the lowest decline in the east. (3) The response of cultivated land quality to paddy field transformation in the study area had a dual effect, and the negative response was more sensitive. The overall response of cultivated land quality in the east was higher than that in other regions. [Conclusion] Paddy farmland in the study area has positive and negative effects on the quality of cultivated land. Adjusting the structure of cultivated land use according to the effect direction is an important way to protect black soil cultivated land. For areas with positive effects, the drought to water project should be moderately promoted, while for areas with negative effects, the drought to water project should be

收稿日期: 2022-10-14

修回日期: 2022-11-16

资助项目: 黑龙江省博士后资助项目“黑龙江省松嫩平原土壤空间分异特征及驱动力分析”(LBH—Z12032)

第一作者: 张慧(1976—), 女, 山东金乡人, 副教授, 博士, 主要从事土地利用与规划研究。E-mail: 2003zhanghui@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

stopped, paddy field fallow should be actively carried out, and it can be properly restored to dry land.

Keywords: cultivated land quality; paddy farmland; CRITIC model; bivariate local spatial autocorrelation; black soil area; Fujin City

消除饥饿,实现粮食安全,改善营养状况和促进可持续农业是联合国 2030 年可持续发展议程的 17 项目标之一,旨在全球范围内消除一切形式的饥饿,保证所有人享有充足且营养的食物^[1],可见粮食安全是全球重点关注的问题之一,也是当前研究的热点话题。耕地作为粮食生产的载体,其质量的高低与时空变化决定了全球粮食的供给数量,从而深刻影响着全球粮食安全的格局。但随着近几年新型冠状病毒疫情在全球的肆虐,极端气候天气的频发以及全球范围内粮食竞争的加剧^[2],严重影响着耕地资源的质量与健康,进而对粮食安全造成巨大的威胁。黑土地作为最为优质的耕地资源,是指拥有黑色或暗黑色腐殖质表土层的土地^[3-4],相较于其他耕地资源,具有性状好、肥力高、适宜农耕等优势,但其占全球陆地总面积不足 7%^[5],每形成 1 cm 厚的黑土需要 200~400 a 的时间^[6],是十分稀缺且再生能力较弱的土壤与耕地资源,因此保护黑土耕地资源数量,提升黑土耕地资源质量对保障国家粮食安全至关重要,是目前国家和科学界亟待解决的关键性问题之一。

相关研究指出,受近些年来利益的驱动,促使有条件的区域将大规模的旱地转换为水田^[7]。而在耕地水田化的过程中一方面将深刻影响着耕作土壤的物理、化学以及生物学的过程降低黑土耕地的自然质量;另一方面会通过工程技术手段完善耕地的形态、连通性、灌排设施等外在利用条件,驱动水平方向上的景观生态过程,从而促进黑土耕地人工质量的提升。东北黑土区是世界四大片黑土区之一,随着近几十年来全球气候变化和人类对黑土耕地的主观利用和改造,使开垦初期的耕地利用结构和类型发生大规模的变化,现有研究显示东北黑土区典型省域黑龙江省自 2000 年起耕地水田化现象较为剧烈和普遍^[8],在大规模的水田化过程中引发了诸多生态环境恶化的问题,特别是在旱改水区域,频繁出现耕地土壤板结、土壤盐渍化、地力下降的质量退化的问题,给黑土耕地资源的可持续利用和粮食安全的保障带来巨大的危机与挑战。本研究旨在探讨东北黑土区耕地水田化过程中耕地质量的空间响应,优化完善黑土区休耕轮作制度,对黑土区耕地质量的保护与提升具有一定的理论和现实意义。

当前学界针对耕地利用变化对耕地质量的影响研究较为少见,多是聚焦于耕地资源的空间分布特征变化^[9]、耕地资源与其他地类之间的转换关系^[10]、新

增和流失耕地资源的空间分布等^[11]几方面,对中国耕地资源空间分布格局的变化进行刻画,并且进一步探讨了耕地资源空间格局的改变对耕地生产能力^[12]、耕地生态水平^[13-14]、耕地质量^[15]之间的作用关系,为本研究注入了重要的思路。但遗憾的是,既有研究主要是从耕地一级类的视角切入,探讨耕地空间格局变化对耕地产能、质量、生态的影响,而耕地二级类间的转换也深刻影响着耕地生态水文过程、耕种强度以及外部的利用条件。因此,亟待从耕地二级类的视角,阐明耕地质量对耕地利用变化的响应。值得强调的是,在影响关系的分析方面,目前以全局性的静态分析为主,但耕地质量受耕地立地条件对应的光照、降水、温度、地形、土壤等多因素影响,具有一定的空间异质性,因此耕地利用的变化对耕地质量影响也必然存在一定的地异特征。为此,亟需开展空间动态性的研究,弥补现有研究的不足,但目前对该方面的研究却鲜有报道。

富锦市是我国重要的商品粮基地,在保障国家粮食安全方面做出了巨大贡献。但自 2000 年开始,富锦市连续多年开展了旱地改水田的项目,耕地利用方式发生了较大的改变,进而影响着耕作土壤的物理、化学以及生物学的过程,最终造成区域耕地质量改变,因此有必要明确该阶段耕地质量对耕地水田化进程的响应。鉴于此,本研究以富锦市为研究区,从耕地利用的二级类入手,基于 Google Earth 高清历史影像、富锦市 2009 年国土资源第二次调查和 2019 年第三次调查矢量数据以及土壤数据,采用 CRITIC 模型、双变量局部空间自相关模型,明确耕地质量和耕地利用变化的时空分异特征,揭示二者在空间上的响应关系,并提出未来治理的对策建议。研究打破传统从耕地一级类视角分析的局限,深入挖掘耕地质量与耕地利用变化间的空间动态响应关系,旨在为黑土区耕地利用方式的调整以及休耕轮作区的科学划定提供参考与借鉴。

1 研究区概况

富锦市位于黑龙江省东北部,松花江南岸,三江平原腹地,位于 131°25′—133°26′E,46°45′—47°37′N,地势西高东低、北高南低,形成冲积平原,地形平缓开阔,富锦市境内有乌苏里江、松花江等多条河流,交互成网,地表水资源极为丰富。境内土壤种类丰富,主要以黑土、草甸土为主,土壤肥沃,土壤有机质含量为全国平均水

平的 6 倍,具有水稻生产的良好基础,是我国重要的商品粮基地。富锦市作为黑土保护的重点区域,在保障国家粮食安全上起到了重要作用,因此,亟需明确富锦市耕地水田化对质量的作用关系。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究土地利用数据来源于 2009 年、2019 年富锦市第二次和第三次全国土地调查矢量数据库,并基于 Google Earth 高清历史影像和中国科学院资源环境数据中心提供的 2000 年土地利用数据进行人工修正。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 中国土壤有机质数据集(1980—1990 年)和中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集(2010—2018 年),1990—2000 年富锦市耕地利用强度较弱,土壤理化属性变化微弱,故利用 Envi 软件提取中国土壤有机质数据集(1980—1990 年)中相关指标表征研究区 2000 年土壤理化属性、提取中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集(2010—2018 年)中相关数据表征研究区 2020 年土壤理化属性^[16],并将土壤数据重采样到 10 m。另外,本文的研究对象为研究期初耕地二级类为旱地和水浇地,研究期末耕地二级类为水田的耕地,对两期土地利用数据进行相交处理,即为 2000—2020 年 20 a 间通过旱改水工程增加的水田。

2.2 研究方法

2.2.1 LESA 耕地质量评价体系 LESA 体系是由原美国农业部率先提出的用于农地保护的重要方法,该体系主要由土地评价(LE)和立地分析(SA)两部分构成。LESA 体系具有综合性和灵活性的优点,它既能评价耕地的内在自然属性,又能分析外在环境因素的影响。另一方面,两系统在可拆分的同时也可根据研究目的调节 LE 和 SA 的指数进行综合分析。本文参考已有研究成果^[17],构建耕地自然质量(LE)和立地条件(SA)两个子系统对耕地质量进行综合评价分析。其中,LE 子系统从土壤养分状况、理化性质和生物状况三方面选取土壤全氮含量(TN)、土壤全磷含量(TP)、土壤全钾含量(TK)、土壤有机质含量(SOM)、土壤酸碱度(PH)和土壤生物多样性 7 个指标来反映耕地自然质量的水平高低;SA 子系统从耕作条件和区位条件两方面选取灌溉能力、排水条件、林网密度、道路通达性和田块规整度 5 个指标来反映立地条件的水平。本研究认为耕地水田化带来的自然环境质量和立地条件变化同等重要,故认为 LE 和 SA 的比例为 1 : 1,即 $a = b = 0.5$ 。

LESA=aLE+bSA

(1)

式中:LESA 为耕地质量综合评价得分;LE 为耕地自然质量得分;SA 为耕地立地条件得分; a, b 为权重。

表 1 耕地质量评价指标体系

| Table 1 Index system for evaluating cultivated land quality | | | |
|---|---------|------------|--------|
| 目标层 | 准则层 | 指标层 | 权重 |
| LE(自然质量) | 养分状况变化量 | 土壤全氮含量变化量 | 0.2087 |
| | | 土壤全磷含量变化量 | 0.2238 |
| | | 土壤全钾含量变化量 | 0.1564 |
| | 理化性质变化量 | 土壤有机质含量变化量 | 0.2127 |
| | | 土壤酸碱度变化量 | 0.1397 |
| | 生物状况变化量 | 土壤生物多样性变化量 | 0.0587 |
| | | 灌溉能力变化量 | 0.3284 |
| SA(立地条件) | 耕作条件变化量 | 排水条件变化量 | 0.2505 |
| | | 林网密度变化量 | 0.1885 |
| | | 田块规整度变化量 | 0.0942 |
| | 区位条件变化量 | 道路通达性变化量 | 0.1384 |
| | | | |

注:土壤酸碱度为峰值型函数,酸碱度过高与过低均会造成耕地质量的下降,本文根据《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($y = 1 / (1 + a(u - c)^2)$), $a = 0.20972, c = 6.77605$)计算研究区土壤酸碱度的隶属值。

2.2.2 CRITIC 模型 CRITIC 法是由 Diakoulaki 提出的客观赋权方法,其原理是综合考虑指标的对比强度和冲突性来确定权重^[18]。对比强度通常用指标标准差的大小进行表征,标准差越大,对比强度越高,权重越大。冲突性是通过指标间的相关系数对其进行衡量,相关系数越大,反映指标间的信息相似度越高,相应的冲突程度越低,权重越小。CRITIC 法相比其他的赋权方法全方位地分析了指标间的特征关系,在考虑指标变异性的基础上加强了指标间信息冗余度的考量,突出了指标间的协调性提高了指标权重测算的准确性。本研究基于 ArcGIS 平台,以研究时期内土壤及农田基础设施指标的变化量为基础,采用 CRITIC 模型,测算各指标变化量权重,构建研究区 LESA 耕地质量变化评价指标体系(表 1),明确研究区耕地质量变化时空特征。另外,为消除指标间的量纲的影响,本研究采用极差标准化将各指标均归并至 $[-1, 1]$ 。

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

(2)

$$R_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij})$$

(3)

$$C_j = S_j R_j$$

(4)

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}$$

(5)

式中: m 为评价对象数; n 为评价指标数; S_j 为第 j 个指标的标准差; R_i 为第 i 个指标与其他指标的冲突性; r_{ij} 为指标 i 和 j 之间的相关系数; C_j 为信息量; W_j 为 j 指标的权重。

2.2.3 双变量局部空间自相关 空间自相关是一种分析变量在空间上的分布特征以及变量间聚集程度的方法,可识别出一定空间范围内地理要素属性值的空间分布模式,包括全局自相关和局部空间自相关^[19]。双变量局部空间自相关模型是由 Anselin 提出的,用来揭示同一地理单元不同变量间的空间关联特征。本文利用 GeoDa 空间统计软件,基于耕地水田化规模和耕地质量变化数据,运用双变量空间自相关模型,探究耕地质量与耕地水田化的空间响应关系。

$$I_{pq} = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \left(\frac{p_i - \bar{p}}{\sigma_p} \right) \left(\frac{q_j - \bar{q}}{\sigma_q} \right)}{(N-1) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (7)$$

式中: I_{pq} 为分析单元耕地水田化面积 p 和耕地质量变化 q 的双变量全局自相关系数; p_i 和 q_i 为第 i 个分析单元的耕地水田化面积和耕地质量变化量(提升/下降), σ_p, σ_q 为方差。为了更为详细具体地展示各分析单元之间的空间关系,采用 LISA 测度局部空间自相关关系,并将其分别分为高一高聚集(H—H)、高一低聚集(H—L)、低—低聚集(L—L)和低—高聚集(L—H)4个类型区,另外本研究根据发生水田化耕地的平均规模,构建 300 m 地理网格作为分析基本单元。

3 结果与分析

3.1 耕地水田化时空特征

2000—2020 年富锦市耕地水田化现象强烈且空间差异显著,耕地水田化面积共 2 691.14 km²,占研究区耕地总面积的 42.92%,年均变化量为 134.56 km²/a。从空间上来看,富锦市各乡镇均发生了耕地水田化现象,其中,研究区东部耕地水田化现象最为明显,西部次之,中部地区水田化现象相对较弱(图 1)。

研究区东部地区耕地水田化程度最高,其中农垦建三江分局耕地水田化面积和比重最大,水田化面积为 1 544.182 km²,占垦区耕地总面积的 74.39%;宏胜镇耕地水田化面积为 137.32 km²,占镇域耕地总面积的 63.92%;二龙山镇耕地水田化面积为 186.56 km²,占镇域耕地总面积的 48.87%;两镇一农垦耕地水田化面积占耕地总面积的平均比例约为 70%,远超过研究区平均水平。研究区西部耕地水田化规模处于中等水平,其中红兴隆分局耕地水田化规模最高,水田化面积为 81.77 km²,占垦区耕地总面积的 51.40%;上街基镇耕地水田化规模次之,水田化面积为 118.21 km²,占镇域耕地总面积的 50.17%;长安镇耕地水田化面积为 115.78 km²,占镇域耕地总面积的 49.69%;锦山镇耕地水田化面积为 188.50 km²,占镇域耕地总面积的 48.18%;富锦镇耕

地水田化程度最低,水田化面积为 21.06 km²,占镇域耕地总面积的 39.48%,四镇一农垦耕地水田化面积占耕地总面积的 48.99%,略高于研究区平均水平。研究区中部耕地水田化规模最低,其中,砚山镇耕地水田化规模最高,水田化面积为 74.12 km²,占镇域耕地总面积的 47.37%;大榆树镇耕地水田化面积为 61.27 km²,占镇域耕地总面积的 21.99%;兴隆岗镇耕地水田化面积为 78.78 km²,占镇域耕地总面积的 21.93%;向阳川镇耕地水田化面积为 70.84 km²,占镇域耕地总面积的 21.63%;头林镇耕地水田化面积最低,水田化面积为 12.52 km²,占镇域耕地总面积的 10.27%;五镇耕地水田化面积占耕地总面积的 23.92%,远低于研究区平均水平。

富锦市地形自西北向东南倾斜,市域范围内水资源丰富,拥有松花江、七星河、挠力河以及季节性河流别拉洪河、莲花河等水系,因此研究区东部的低洼平原面临着农业涝灾的威胁。研究区耕地开垦初期多数为旱地,但随着全球气候的变化,降水量持续增加,东北低洼处耕地时常出现内涝问题,造成粮食产量发生下降。为此 2000 年以来,黑龙江垦区提出“以稻治涝”的发展理念,大力推行作物种植结构调整,通过工程技术手段开展旱改水工程,以确保粮食产量的稳定与提高,所以隶属于黑龙江垦区的东部低洼平原发生了大规模旱地向水田转换的现象。另外,由于水稻市场价值的提高,种植水稻的利益高于其他作物,进而增强了农民对水稻种植的意愿,间接驱动着水田化进程,最终造成研究区耕地水田化的时空分异格局。

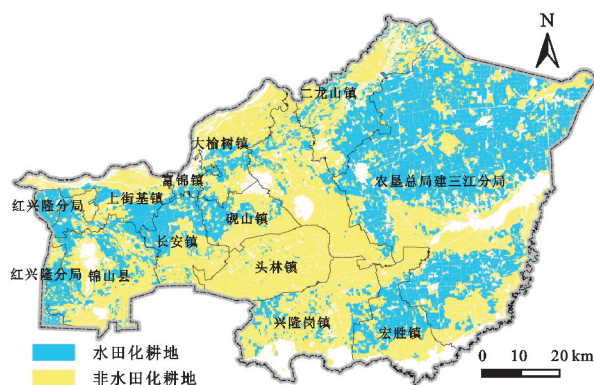


图 1 2000—2020 年富锦市耕地水田化空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of arable land hydroponics in Fujin from 2000 to 2020

3.2 耕地质量时空变化特征

2000—2020 年富锦市水田化耕地质量变化显著,耕地质量提升的面积高于质量下降的面积,质量提升的耕地面积为 1 825.21 km²,占水田化耕地总面积的 67.95%,质量下降的耕地面积为 856.68 km²,占耕地水田化总面积的 31.89%,质量未发生变化的

耕地面积为 4.27 km²,占耕地水田化总面积的 0.16%。从空间上来看,富锦市各乡镇水田化耕地均发生了质量变化,富锦市中部地区耕地质量下降比重最高,西部地区次之,东部地区量下降比重最低(图 2)。

研究区中部耕地质量下降比重最高,耕地质量提升比例最低,且二者占比相当。其中,大榆树镇耕地质量提升的面积为 27.89 km²,占镇域耕地水田化总面积的 45.52%,耕地质量下降的耕地面积为 33.38 km²,占镇域耕地水田化总面积的 54.48%;砚山镇耕地质量提升的面积为 55.10 km²,占镇域耕地水田化总面积的 74.35%,耕地质量下降的面积为 18.99 km²,占镇域耕地水田化总面积的 25.63%;向阳川镇耕地质量提升的面积为 32.32 km²,占镇域耕地水田化总面积的 45.63%,耕地质量下降的面积为 37.64 km²,占镇域耕地水田化总面积的 53.14%;头林镇耕地质量提升的面积为 7.37 km²,占镇域耕地水田化总面积的 58.89%,耕地质量下降的面积为 5.15 km²,占镇域耕地水田化总面积的 41.11%;兴隆岗镇耕地质量提升的面积为 51.04 km²,占镇域耕地水田化总面积的 64.79%,耕地质量下降的面积为 27.52 km²,占镇域耕地水田化总面积的 34.93%;五镇耕地质量提升与下降的面积分别占水田化耕地总面积的 58.39%和 41.23%。

研究区西部耕地质量下降比重与耕地质量提升比例均为次高,但耕地质量提升比例远高于耕地质量下降的比例。其中,上街基镇耕地质量提升的面积为 84.00 km²,占镇域耕地水田化总面积的 71.06%,耕地质量下降的面积为 33.85 km²,占镇域耕地水田化总面积的 28.64%;富锦镇耕地质量提升的面积为 13.99 km²,占镇域耕地水田化总面积的 66.42%,耕地质量下降的面积为 6.72 km²,占镇域耕地水田化总面积的 31.91%;红兴隆分局耕地质量提升的面积为 59.50 km²,占镇域耕地水田化总面积的 72.76%,耕地质量下降的面积为 21.88 km²,占镇域耕地水田化总面积的 26.76%;锦山镇耕地质量提升的面积为 102.01 km²,占镇域耕地水田化总面积的 54.12%,耕地质量下降的面积为 86.08 km²,占镇域耕地水田化总面积的 45.66%;长安镇耕地质量提升的面积为 88.15 km²,占镇域耕地水田化总面积的 76.13%,耕地质量下降的面积为 27.25 km²,占镇域耕地水田化总面积的 23.53%;四镇一农垦耕地质量提升与下降的面积分别占水田化耕地总面积的 66.18%和 33.46%。

研究区东部耕地质量下降比重最低,耕地质量提升比例最高,耕地质量提升比例远高于耕地质量下降比例。其中,二龙山镇耕地质量提升的面积为 156.55 km²,

占镇域耕地水田化总面积的 83.92%,耕地质量下降的面积为 28.76 km²,占镇域耕地水田化总面积的 15.41%;农垦总局建三江分局耕地质量提升的面积为 1 060.77 km²,占镇域耕地水田化总面积的 68.69%,耕地质量下降的面积为 478.65 km²,占镇域耕地水田化总面积的 31.09%;宏胜镇耕地质量提升的面积为 86.51 km²,占镇域耕地水田化总面积的 63.00%,耕地质量下降的面积为 50.81 km²,占镇域耕地水田化总面积的 37.00%;两镇一农垦耕地质量提升与下降的面积分别占水田化耕地总面积的 69.80%和 29.88%。

当前国家对耕地保护的认知已从初期的数量保护向数量、质量、生态“三位一体”保护的理念转变,在近几十年实施了多项耕地保护对策。研究区多年来分别实施了永久基本农田划定、耕地占补平衡、城乡建设用地增减挂钩、土地综合整治以及高标准农田建设等项目,对耕地的数量保护、质量的提升、生态的改善均具有积极正向作用。在很大程度上完善了农业基础设施,提高了耕地的灌排条件,打造了旱涝保收且与现代农业生产和经营模式相吻合的农田。特别是在东部垦区系统化、科学化、规模化地进行耕地建设与利用和管理的条件下,使该地区耕地质量发生大规模提高。但仍然值得我们关注的是,部分水田化的耕地也发生了质量下降的问题,且在全域范围内分布较为普遍和广泛。究其原因主要在于,研究区常年以高物质投入为理念的集约化农业,增加了耕地的负荷,重用轻养的种植模式使耕地无法得到休养,同时以化肥、农药、地膜等大量投入为特点的化石农业,改变了土壤的理化性质以及各种循环过程,最终引致研究区普遍发生耕地质量下降的问题。

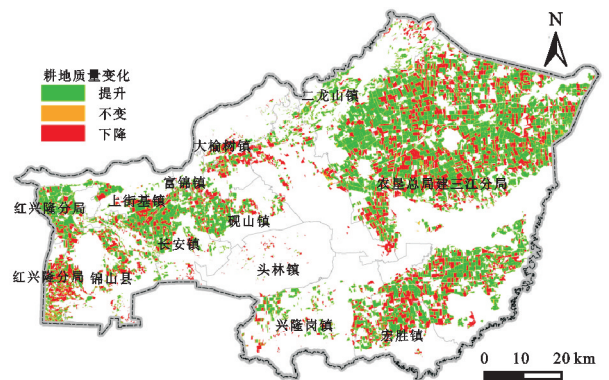


图 2 2000—2020 年富锦市耕地质量变化空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of changes in arable land quality in Fujin City from 2000 to 2020

3.3 耕地质量对耕地水田化的空间响应

研究区耕地质量提升和下降与耕地水田化规模具有正、负双重空间响应,二者均以 H—H 正相关和

H—L 负相关为主并零星伴有 L—L 正相关和 L—H 负相关的空间响应模式(图 3),并且存在东部耕地质量对水田化的空间响应程度高于其他区域的空间格局。除此之外,研究区耕地水田化面积与耕地质量提升和下降的双变量局部空间自相关系数分别为 0.042, 0.102,且在 1%的显著性水平下通过检验,表明耕地水田化与耕地质量提升和下降均存在显著的空间正相关,具有双重空间响应,且耕地水田化与耕地质量下降间的空间关联性较高,敏感性更强。

耕地水田化与耕地质量提升之间的响应关系以 H—H 和 H—L 型为主,以 L—L 和 L—H 型为辅。耕地大规模水田化与耕地质量提升显著区域,即 H—H 集聚区,主要分布在东北部垦区,且大多以团块状分布在距离居民点较近的区域,其地形等自然条件和管理等社会经济条件都相对较为优越,耕地水田化面积的增大,极大促进了耕地质量的提升。耕地大规模水田化与小幅度耕地质量提升区域,即 H—L 集聚区,分布在农垦建三江分局以外的其他地区,耕地水田化的过程使得土地更为平整,水利设施建设更为完善,在一定程度上提升了耕地质量,但提升的幅度低于垦区,因此地方农区应继续加强农田基础设施建设,完善耕地利用与保护政策。耕地水田化与耕地质量下降之间的响应关系仍以 H—H 和 H—L 型分布为主,并零星伴有 L—L 和 L—H 型分布。耕地大规模水田化与耕地质量小幅度下降的区域,即 H—L 集聚区,在富锦市全域均有分布,表明耕地水田化引致

耕地质量发生小幅度下降的现象在研究区内较为普遍。耕地大规模水田化与耕地质量显著下降的区域,即 H—H 集聚区,在研究区东部以块状离散分布,其根源在于垦区部分耕地的长期和大规模的种植水稻,强烈扰动了土壤的理化性质,使耕地质量发生大程度的下降,因此垦区仍需加强对长期种植水稻的地块进行质量定位的监测与保护,精准实施水田的休耕制度,使质量退化的耕地得以恢复,走用养结合的农业永续发展道路,实现耕地资源的可持续利用。

在耕地“旱改水”即耕地水田化的进程中,改变了耕地所处的外部环境,长期的淹水状态对区域地表温度产生了显著的降温效应,相关研究已明确指出三江平原水田地表温度与旱田相比平均温差为-7.8℃^[20],因此水田的大规模开发利用深刻影响着区域热环境和气候并且降低了耕作土壤微生物的活性、阻碍了土壤碳氮和代谢过程。与此同时,水田的种植强度远高于旱田种植,频繁的灌溉和翻耕旋耕等耕作模式,破坏了土壤的团聚体结构和养分输送能力,增加了耕地质量退化的风险。需要说明的是,尽管研究区东北部耕地水田化现象较为剧烈,但并未对耕地质量造成影响,反而却起到了提升的作用,其主要原因是垦区内已实现规模化、现代化和科学化的种植模式,保护性耕作技术和休耕制度已得到全面推广,地区土壤养分含量和蓄水能力明显提升,有效减少了土壤侵蚀和水蚀现象的发生。并且垦区在耕地布局上更为规整、农田基础设施建设上也更为完善,对耕地质量保护均起到了积极作用。

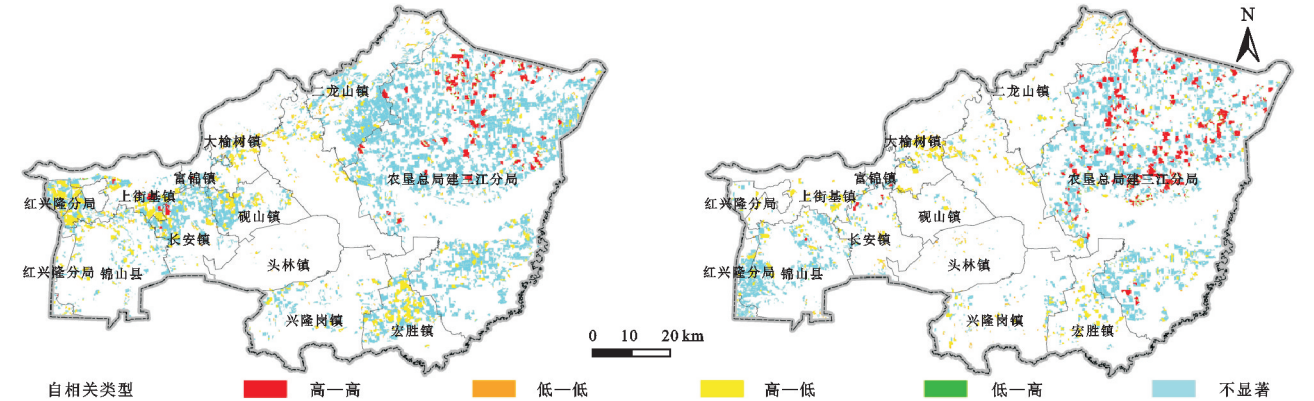


图 3 2000—2020 年富锦市耕地质量对耕地水田化空间响应

Fig. 3 Spatial response of cropland quality to cropland hydroponics in Fujin City from 2000 to 2020

4 讨论与结论

4.1 讨论与对策

本研究从耕地利用变化将深刻影响耕作土壤理化性质和外在利用条件的视角入手,运用 LESA 耕地质量评价体系、CRITIC 模型以及双变量局部空间自相关模

型,明确了研究区耕地水田化和耕地质量的时空变化特征,揭示和刻画出了耕地质量对耕地水田化的空间响应,结果表明耕地水田化对耕地质量具有正、负两方面的效应。基于此,本文提出以下两点治理对策。

在耕地水田化促进耕地质量提升方面,对耕地大规模水田化促进质量大幅度提升区域(H—H 区域)

应适当的增加耕地水田化规模,积极地进行“旱改水”项目,改善耕地的形态以及农业基础设施,提升耕地质量;针对耕地大规模水田化促进质量小幅度提升区域(H—L 区域)应限制耕地水田化过程,提高旱改水项目的提质效率,准确诊断质量提升的限制性因子,以全域土地综合整治和高标准农田建设为主要手段,突破限制性因子的约束,提高区域耕地质量。

在耕地水田化诱致耕地质量下降方面,对耕地大规模水田化造成质量大幅度下降区域(H—H 区域)应禁止耕地旱改水项目,并对已经实现水田化的耕地进行休耕,利用“天一空一地”立体监测技术,对该类耕地进行长期定量监测,组织建立专家智库,对耕地质量作出准确评价,及时修正休耕年限;对质量难以得到提升的耕地可对其进行水改旱和退耕,减少人类耕种活动对耕地的扰动。针对耕地大规模水田化导致质量小幅度下降区域(H—L 区域)应继续推进保护性耕作制度,使质量轻度下降的耕地得以恢复,并且积极探索更符合研究区域的保护性耕作模式,改善耕作土壤的理化性质以及外在利用条件,增强耕地抵御外界不利因素的能力,提高耕地系统韧性,实现黑土耕地的永续利用。

4.2 结 论

(1) 研究期内富锦市耕地水田化现象强烈且空间差异显著,耕地水田化面积共 2 691.14 km²,占研究区耕地总面积的 42.92%,年均变化量为 134.56 km²/a。其中,东部地区耕地水田化现象最为显著,西部次之,中部相对较弱。

(2) 研究期内富锦市水田化耕地质量变化显著,质量提升的耕地面积占耕地水田化总面积的 67.95%,质量下降的耕地面积占耕地水田化总面积的 31.89%,质量未发生变化的耕地面积占耕地水田化总面积的 0.16%;在空间维度上,富锦市各乡镇的耕地水田化过程均引发耕地质量改变,其中中部地区耕地质量下降比例最高,西部地区次之,东部地区下降比例最低。

(3) 富锦市耕地质量对耕地水田化具有双重响应,耕地质量下降对耕地水田化的响应更为敏感,研究区整体呈现出东部垦区耕地质量对耕地水田化响应程度高于其他地方农区的空间格局。

参考文献:

[1] 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 the

resilience of cultivated land in the black soil area of northeast China under multiple pressure stress and its insights:A case study of Baiquan County, Heilongjiang Province[J]. China Land Science, 2022,36(5):71-79.

[2] 邓祥征,梁立,廖晓勇,等.国际粮食贸易影响下东北黑土地生产压力变化与保护策略[J].自然资源学报,2022,37(9):2209-2217.
Deng X Z, Liang L, Liao X Y, et al. Changes in production pressure and conservation strategies of black land in Northeast China under the influence of international food trade[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2209-2217.

[3] 张佳宝,孙波,朱教君,等.黑土地保护利用与山水林田湖草沙系统的协调及生态屏障建设战略[J].中国科学院院刊,2021,36(10):1155-1164.
Zhang J B, Sun B, Zhu J J, et al. Coordination of black land conservation and utilization with landscape, forest, lake, lake, grass and sand system and ecological barrier construction strategy[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2021,36(10):1155-1164.

[4] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
Han X Z, Li N. Progress and prospects of blackland research in Northeast China[J]. Geoscience, 2018,38(7):1032-1041.

[5] 李保国,王健.依法建立我国黑土地保护治理体系[J].中国土地,2022(7):19-21.
Li B G, Wang J. Establishing China's black land protection and governance system according to law[J]. China Land, 2022(7):19-21.

[6] 牛善栋,吕晓,谷国政.感知利益对农户黑土地保护行为决策的影响研究:以“梨树模式”为例[J].中国土地科学,2021,35(9):44-53.
Niu S D, Lv X, Gu G Z. Research on the influence of perceived benefits on farmers' decisions on blackland conservation behavior:an example of the 'Lishu model' [J]. China Land Science, 2021,35(9):44-53.

[7] 杨宏轶,赵华甫.耕地结构变化下水土资源匹配时空特征效应分析:以黑龙江省为例[J].自然资源学报,2022,37(9):2247-2263.
Yang H Y, Zhao H F. Analysis of the effect of spatial and temporal characteristics of soil and water resources matching under the change of arable land structure:the case of Heilongjiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2247-2263.

[8] 梁爱珍,张延,陈学文,等.东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J].地理科学,2022,42(8):1325-1335.
Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, et al. Research on the development status and effectiveness of conservation

- farming in the Northeast Black Soil Region[J]. *Geoscience*, 2022, 42(8): 1325-1335.
- [9] 任平, 吴涛, 周介铭. 基于 GIS 和空间自相关模型的耕地空间分布格局及变化特征分析: 以成都市龙泉驿区为例[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(3): 325-334.
- Ren P, Wu T, Zhou J M. Analysis of spatial distribution pattern and change characteristics of arable land based on GIS and spatial autocorrelation model: Taking Longquanyi District of Chengdu City as an example[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2016, 24(3): 325-334.
- [10] 刘丹, 璩路路, 李琳娜. 黑龙江北部边境样带土地利用时空变化特征及其驱动因素[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(3): 417-423.
- Liu D, Qu L L, Li L N. Spatial and temporal land use change characteristics and its driving factors in the northern border sample zone of Heilongjiang[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 2021, 57(3): 417-423.
- [11] 王梦溪, 潘开文, 伍小刚, 等. 青藏高原耕地面积时空变化特征及其驱动因子[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(4): 859-868.
- Wang M X, Pan K W, Wu X G, et al. Spatial and temporal variability of arable land area on the Qinghai-Tibet Plateau and its driving factors[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(4): 859-868.
- [12] 肖丽群, 陈伟, 吴群, 等. 未来 10 a 长江三角洲地区耕地数量变化对区域粮食产能的影响: 基于耕地质量等别的视角[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 565-576.
- Xiao L Q, Chen W, Wu Q, et al. The impact of arable land quantity changes on regional grain production in the Yangtze River Delta in the next 10 a: a perspective based on arable land quality level[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 565-576.
- [13] 黄海潮, 雷鸣, 孔祥斌, 等. 中国耕地空间格局变化及其生态系统服务价值响应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 339-348.
- Huang H C, Lei M, Kong X B, et al. Spatial pattern changes of cropland and its ecosystem service value response in China [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2022, 29(1): 339-348.
- [14] 张建宁, 陈璿亭, 王勇, 等. 北方农牧交错带耕地利用变化对生态系统服务价值影响: 以宁夏回族自治区吴忠市为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 283-291.
- Zhang J N, Chen T, Wang Y, et al. Impacts of arable land use changes on ecosystem service values in the northern agro-pastoral mosaic zone: An example from Wuzhong City, Ningxia Hui autonomous region [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2021, 28(6): 283-291.
- [15] 祝锦霞, 徐保根. 基于变化向量的耕地利用方式变化下耕地质量评价[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 292-300.
- Zhu J X, Xu B G. Evaluation of arable land quality under the change of arable land use based on change vector [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2020, 36(2): 292-300.
- [16] 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 H H, Song G, Gao J, et al. Spatial and temporal variation of ecological degradation of arable land in a typical region of Northeast China's black soil area: the case of Fujin City [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9): 2277-2291.
- [17] 钱凤魁, 项子璇, 王贺兴, 等. 基于国土空间三线融合的城市周边耕地分区保护研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1164-1173.
- Qian F K, Xiang Z X, Wang H X, et al. Research on zoning protection of arable land around cities based on the integration of three lines of land space [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1164-1173.
- [18] 赵金辉, 田林, 李思源, 等. 黄河流域能源与环境—经济—生态耦合协调发展研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(11): 13-19.
- Zhao J H, Tian L, Li S Y, et al. Study on the coordinated development of energy and environment-economy-ecology coupling in the Yellow River Basin [J]. *People's Yellow River*, 2022, 44(11): 13-19.
- [19] 钱凤魁, 逢然然, 于洋, 等. 辽宁省不同地貌区耕地景观格局与耕地质量空间关联特征及作用机制[J]. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(1): 113-124.
- Qian F K, Pang R R, Yu Y, et al. Spatial correlation between landscape patterns of cropland and cropland quality in different landscape areas of Liaoning Province and the mechanisms of their effects [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture (in English)*, 2023, 31(1): 113-124.
- [20] 金翠, 李欣涛, 佟欣羽, 等. 三江平原水田景观对局地热环境的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1766-1776.
- Jin C, Li X T, Tong X Y, et al. Impacts of paddy landscapes on the local thermal environment in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(5): 1766-1776.