

农业机械学报

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery

ISSN 1000-1298, CN 11-1964/S

《农业机械学报》网络首发论文

题目：黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素
作者：张红梅，宋戈
收稿日期：2020-08-18
网络首发日期：2021-03-04
引用格式：张红梅，宋戈. 黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素. 农业机械学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.s.20210304.1542.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

黑龙江省典型县耕地种植结构空间分异特征与影响因素

张红梅 宋戈*

(东北大学文法学院, 沈阳 110169)

摘要: 为阐明微观地理尺度下耕地种植结构空间分异及其影响因素, 以黑龙江省典型产粮大县为研究区, 以 1km² 地理网格为研究单元, 运用分区统计法、空间自相关分析法及地理探测器模型, 分析水稻、玉米和大豆 3 种主要作物种植结构的空間分异特征, 揭示区域耕地种植结构空间分异的影响机理。结果表明: 研究区耕地种植结构以单一大豆型、单一玉米型和玉米-大豆型为主要类型, 以单一水稻型和大豆-玉米-水稻型为次要类型。不同作物种植结构的空間集聚性特征存在一定差异, 水稻以 HH 型为主, 玉米和大豆以 HH 型和 LL 型为主。地形条件是水稻种植结构空间分异的主导因素, 玉米和大豆种植结构空间分异主要受气候条件和土壤条件影响, 自然条件仍是耕地种植结构空间分异的关键性影响要素。研究区耕地种植结构空间分异是多因子交互作用的结果, 因子交互作用的影响均比单一因子影响程度大。市场区位和交通区位与其他因子的交互作用对玉米种植结构空间分异的影响程度大幅度提升, 对于水稻, 灌溉潜力对因子交互作用的影响最强, 但因子交互作用对大豆种植结构空间分异的影响程度提升不大。研究结果有利于理解不同粮食作物种植结构空间分异的形成机理及其差异, 为耕地种植结构优化调整提供科学依据。

关键词: 耕地利用; 种植结构; 粮食作物; 空间分异; 地理探测器; 黑龙江省典型县

中图分类号: F321.1

文献标识码: A

OSID:



Spatial Differentiation Characteristics and Influencing Factors of Cultivated Land Planting Structure in Typical Counties of Heilongjiang Province

ZHANG Hongmei SONG Ge

(Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang 110169, China)

Abstract: In order to clarify the spatial differentiation of cultivated land planting structure and its influencing factors at the micro-geographical scale, in this paper, the typical grain-producing counties in Heilongjiang Province were selected as the research area, the 1km² geographic grid was used as the research unit, and the regional statistical method, spatial association analysis method and geographic detector model were used to analyze the spatial differentiation characteristics of the three main crops of rice, corn and soybean, and reveal the influence mechanism of the spatial differentiation of regional cultivated land planting structure. The results show that: 1) The planting structure in the region is mainly single soybean type, single corn type and corn-soybean type, and single rice type and soybean-corn-rice type are secondary types. There are some differences in the spatial agglomeration characteristics of different crop planting structures. Rice is mainly HH type, and corn and soybean are mainly HH and LL types. 2) Terrain are the dominant factor in the spatial differentiation of rice planting structures, and that of corn

收稿日期: 2020-08-18

修回日期: 2020-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971247、41571165), 国家社科基金重大项目 (19ZDA096), 辽宁省自然资源科技创新项目 (19LNZRZY28) 和辽宁省自然资源事务服务中心项目 (JH20-210000-36958 001 包)

作者简介: 张红梅 (1992-), 女, 博士生, 主要从事土地利用与管理研究, E-mail: 18640553575@163.com

通信作者: 宋戈 (1969-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用与管理研究, E-mail: songgelaoshi@163.com

and soybean are climatic and soil conditions. Natural conditions are still the key influencing factors in the spatial differentiation of cultivated land planting structures. 3) The spatial differentiation of cultivated land planting structure is the result of multi-factor interaction. The interaction of market location and traffic location with other factors has greatly improved the spatial differentiation of corn planting structure. For rice, irrigation potential has the strongest impact on factor interaction. However, the effect of factor interaction on the spatial differentiation of soybean planting structure is not much improved. The research results are helpful to understand the formation mechanism and differences of the spatial differentiation of different food crops, and provide a scientific basis for the optimization and adjustment of cultivated land planting structure.

Key words: cultivated land use; planting structure; food crops; spatial differentiation; geographic detectors; typical counties of Heilongjiang Province

0 引言

耕地种植结构是一定区域或生产单位内所种植的农作物种类、面积比例及其组合关系^[1],反映不同耕作制度和社会经济条件下人类对耕地资源的差别化利用方式。在自然因素和人文因素的共同作用下,耕地种植结构表现出明显的空间分异特征,探究耕地种植结构空间分异的影响因素是作物时空变化机制及模拟等研究的基础^[2],也是种植结构优化调整及其政策制定的重要依据。21世纪以来,随着农业发展内部因素和国际环境的变化,中国耕地及粮食种植格局发生明显变化^[3],区域粮食种植结构失衡严重,对耕地生态安全和粮食安全造成了一定威胁^[4]。准确把握耕地种植结构空间分异的成因,对于探明耕地种植结构形成机理、推进种植结构优化调整,进而保障耕地生态及粮食安全具有重要意义。

近年来,随着中国耕地种植结构失衡及粮食供求结构性矛盾不断突出,关于耕地种植结构影响因素的研究受到学术界的广泛关注。微观层面上,相关研究多是基于农户视角,运用农户数据和多种计量模型^[5-6],分析农户特征、农产品价格、农地产权、农地流转和土地细碎化程度等因素对种植结构的影响^[7-9]。宏观层面上,则多以省、市或县级行政区为研究单元,基于长时间序列统计数据或农业遥感数据,运用面板数据模型和空间计量分析模型等,分析人力资本、技术进步、政策环境、基础设施和农业区位等社会经济因素^[10-12],以及气候、水资源等自然因素^[13]对种植结构时空变化的影响。耕地种植结构形成和变化的影响因素较为复杂,自然条件是影响耕地种植结构的先决因素,随着社会经济的发展,社会经济因素、政策导向和市场等因素的作用也越发凸显。已有研究成果对于分析种植结构格局变化规律及其影响机制发挥了重要作用,但在研究尺度上多是基于农户个体或宏观空间尺度进行研究,难以揭示微观地理尺度下的种植结构空间分异特征及影响机理,且少有研究考虑因子交互作用对种植结构空间分异的影响。大量研究表明,微观地理网格尺度能够较为细致地刻画农田分布特征^[15],1km²是作物及多种耕地利用要素空间表达的适宜尺度^[14-15],探究该尺度下多因子交互作用对种植结构空间分异的影响,将有助于更深入细致地阐明宏观尺度种植结构布局特征及原因,有利于更好理解不同地理背景下农户微观主体的种植决策行为及其种植结构影响机理。鉴于此,本文以黑龙江省典型产粮大县为研究区,基于作物遥感解译及多种耕地利用要素空间数据,以1km²地理网格为研究单元,分析2018年研究区水稻、大豆和玉米3种主要粮食作物种植结构空间分异特征,从气候、地形、土壤、管理和区位条件选取影响因子,运用地理探测器模型探究单一因子和因子交互作用对耕地种植结构空间分异的影响,为农作物格局变化的机理机制奠定研究基础,为种植结构调整优化和保障国家粮食安全提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

以黑龙江省齐齐哈尔市的克山县、依安县、拜泉县 3 个相互邻接的粮食大县为研究区，其位于松嫩平原北部的黑土带，地处东经 124°50′~126°41′，北纬 47°16′~48°34′，是黑龙江省重要商品粮基地和大豆生产基地。研究区属温带大陆性季风气候，处于黑龙江省第三积温带，年均降水量 500 mm 左右，地貌类型以平原和丘陵漫岗为主，土壤类型主要为黑土和黑钙土，耕作制度为一年一熟制。2018 年，研究区耕地总面积 8307.43 km²，占行政辖区土地总面积的 79.42%，主要作物为水稻、大豆和玉米，种植比例约为 1：8.71：8.64，三种作物播种总面积 8000.70 km²，占耕地面积的 96.31%。21 世纪以来，研究区耕地作物种植结构发生较大变化，玉米种植比例大幅度增加，大豆种植比例减少。2015 年，《农业部关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见》发布，2016 年农业部印发了《全国种植业结构调整规划（2016—2020 年）》，研究区处于种植结构调整的重点区域，研究该地区耕地种植结构影响因素对于优化种植结构和保障粮食安全具有重要的实践参考价值。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 的中国地面累年值月值数据集（1981-2010 年）和中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 的中国气象背景数据集，获取气象站点气温、降水量及积温数据，运用 ArcGIS 进行空间插值分析，获得研究区气象 100m×100m 栅格数据。地形数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘数据 (SRTM)，运用 ArcGIS 提取 30m 坡度矢量数据。土壤数据来源于黑龙江省 1：1000000 土壤类型图和黑龙江省耕地质量主要性状数据集，按照土壤类型对相应的土壤理化性质赋值，获得研究区土壤属性空间矢量数据。耕地管理条件数据来源于二调年度变更数据库，运用 ArcGIS 空间计算及分析功能获取耕地灌溉潜力、排涝能力、耕作便利度、防护林密度及田块形状系数等空间数据。Landsat8 (OLI) 卫星遥感影像数据来源于美国地质勘探局(USGS) 官网，结合研究区作物物候特征及遥感影像质量、云量等情况，选取 2018 年 8 月 18 日、6 月 24 日和 5 月 30 日 3 期 Landsat8 (OLI) 卫星遥感影像区分水稻、大豆和玉米 3 种主要耕地作物。在对 3 期遥感影像辐射定标、大气校正和几何校正等的基础上，分别进行 6、5、2 波段融合，运用 2018 年 5 月 30 日影像区分耕地中的水田与其他作物类型，运用其他两期影像区分耕地中的玉米、大豆与其他作物类型，通过人工目视解译获取研究区耕地主要作物现状分布信息。

2 研究方法

2.1 分区统计法

分区统计法 (Zonal statistics) 是运用分区统计函数，以某个数据集的分类区作为统计单元，对另一个数据集中相应位置的单元值进行统计，最终输出为分类区数据集的每个分区对应的统计值图表。本文基于 ArcGIS 构建研究区矢量地理网格^[16]，将地理网格与作物分布、气候、地形、土壤等要素空间栅格数据分别进行空间叠加，运用平均值函数计算各地理网格内对应各要素的空间统计值，计算式为：

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{kj} / m \quad (1)$$

式中 A_{ij} ——第 i 个地理网格单元第 j 个空间要素的平均值统计结果
 a_{kj} ——第 k 个栅格第 j 个空间要素的数据值
 m ——某地理网格覆盖范围内的栅格个数

2.2 局部空间自相关分析法

局部空间自相关反映某一空间单元与邻近单元属性值的相关程度, 本文采用局部空间自相关分析方法测度耕地作物种植结构空间分布的空间依赖性和集聚性^[17]。依据 Moran's I 值, 局部空间自相关类型分为高高 (HH)、低低 (LL) 两种正相关类型和高低 (HL)、低高 (LH) 两种负相关类型。 z_i 检验可对局部自相关关系进行显著性检验, 在 0.05 的置信度水平下 $|z_i| = 1.96$, $z_i > 1.96$ 表示显著正相关; $z_i < -1.96$ 表示显著负相关; $|z_i| < 1.96$ 表示自相关性不显著。局部 Moran's I 指数计算公式为:

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{s^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \quad (2)$$

式中 I ——空间自相关指数 s^2 ——方差 x_i 、 x_j ——经过标准化的空间单元观测值
 \bar{x} ——均值 w_{ij} ——空间权重 (Queen 邻接空间权重)

2.3 地理探测器法

地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其驱动力的一组统计学方法, 能够探测单一因子以及两因子交互作用对因变量的影响, 并检验其统计显著性^[18]。本文运用地理探测器的分异及因子探测和交互作用探测功能, 分析各类单一因子和两因子交互作用对耕地作物分布的影响。分异及因子探测可探测 Y 的空间分异性, 以及某因子 X 对 Y 空间分异的解释程度, 用 q 值度量。 q 的取值范围为 $[0, 1]$, q 表示自变量对因变量的解释程度, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强, 反之则越弱, q 的计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (3)$$

式中 L ——因变量 Y 或自变量 X 的分类
 N_h 、 N ——层 h 和全区的单元数
 δ_h^2 、 δ^2 ——层 h 和全区的 Y 值的方差

交互作用探测可评估两个不同因子 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 空间分异的解释力, 评估的方法是分别计算两种因子对 Y 的解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 并计算它们交互时对 Y 的解释力 $q(X_1 \cap X_2)$, 再对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较以判定交互作用类型。若 $q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}(q(X_1), q(X_2))$, 则双因子交互作用为非线性减弱; 若 $\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$, 则为单因子非线性减弱; 若 $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$, 则为双因子增强; 若 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$, 则为独立; 若 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$, 则为非线性增强, 非线性增强下的因子交互作用影响增加幅度最大。

3 结果与分析

3.1 耕地种植结构的时空分异特征

本文对各地理网格内的水稻、玉米和大豆 3 种主要作物播种面积占耕地面积比例, 即种植比例进行分区统计, 借鉴相关研究的分类标准^[19], 依据不同作物种植比例划分研究区耕地种植结构类型。为进一步定量描述作物种植结构在空间上的依赖关系和空间集聚性, 对主

要耕地作物种植结构的空間自相关性进行分析。

3.1.1 耕地种植结构的空間分布特征分析

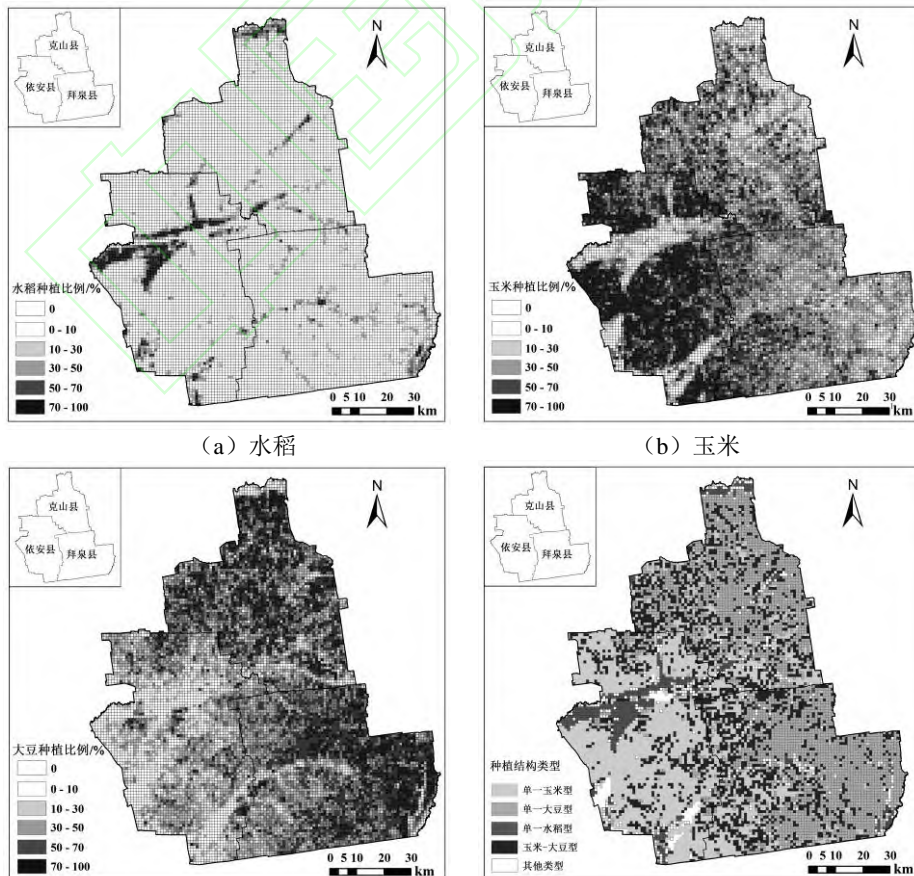
研究区水稻种植面积相对较小，种植水稻的网格比例仅为 14.8%，而水稻种植比例 50% 以上的网格比例仅为 3.16%。水稻种植比例高值区主要集中在依安县中部偏北，零星分布于依安县南部、克山县北部和南部，以及拜泉县中部和东南部。玉米和大豆种植面积相对较大，种植玉米和大豆的网格比例分别为 88.98% 和 86.70%，种植比例大于 50% 的网格比例分别为 30.99% 和 31.89%。玉米种植比例高值区集中分布在依安县，零星分布在克山县西部和南部，以及拜泉县西北部 and 西南部。大豆种植比例高值区则集中分布在克山县和拜泉县，零星分布于依安县北部和中部（图 1a~1c）。

研究区耕地种植结构类型以单一大豆型、单一玉米型和玉米-大豆型为主，所占网格比例分别为 34.70%、32.38% 和 22.58%，单一水稻型和大豆-玉米-水稻型为次要类型，网格比例分别为 4.90% 和 1.76%，大豆-水稻型和水稻-玉米型种植结构的网格比例较小（表 1）。其中，单一大豆型、单一玉米型和单一水稻型种植结构的空間分布与各作物种植比例较高的网格分布特征相似。玉米-大豆型种植结构主要集中分布在拜泉县北部、西北部和西南部，零星分布于克山县和依安县。大豆-玉米-水稻型、大豆-水稻型和水稻-玉米型种植结构的空間分布较为分散，多分布在单一水稻型种植结构网格的边缘（图 1d）。

表 1 研究区耕地种植结构类型统计

Tab.1 Statistics of cultivated land planting structure types in the study area

参数	单一大豆型	单一玉米型	单一水稻型	玉米-大豆型	大豆-水稻型	水稻-玉米型	大豆-玉米-水稻型
网格个数	3745	3495	529	2437	45	105	190
网格比例/%	34.70	32.38	4.90	22.58	0.42	0.97	1.76



(c) 大豆

(d) 耕地

图 1 研究区主要粮食作物及耕地种植结构空间分布

Fig.1 Spatial distribution of main food crops and cultivated land planting structure in the study area

3.1.2 耕地作物种植结构的局部空间自相关特征分析

研究区水稻种植结构的局部空间自相关类型多为不显著型，主要由于其水稻种植面积较小，大部分地区未种植水稻。在显著型区域，水稻种植结构的局部空间集聚特征以 HH 型为主，集中分布于依安县的新兴乡、依安农场、太东乡、新发乡一带，克山县北兴镇北部和拜泉县三道镇东南部水稻种植结构的 HH 型集聚特征也较为明显，LH 型则主要分布在 HH 型边缘，边缘区域易受其中心区域影响，水稻种植比例增加，导致该区域水稻种植具有向外扩张趋势。玉米和大豆种植结构的局部空间自相关类型多为显著型。其中，玉米种植结构的局部空间集聚特征以 HH 型和 LL 型为主，HH 型成片集中分布在依安县中部的三兴镇、中心镇、阳春乡、解放乡、依龙镇和双阳镇。此外，依安县先锋乡、新屯乡、太东乡和富饶乡，以及拜泉县爱农乡玉米种植结构的 HH 型集聚特征也较为明显，LH 型主要被 HH 型包围，区域内部玉米种植比例极易受周围影响，玉米种植比例增加，进而产生玉米种植的集中连片效应。LL 型玉米种植结构呈带状分布于依安县新兴乡、依安农场、新发乡，呈片状分布于克山县东北部的北兴镇-曙光乡-向华乡-河北乡，以及拜泉县东部的兴农镇、兴华乡、上升乡、国富镇、三道镇、兴国乡，HL 型则主要分布于 LL 型之间，易被成片的 LL 型种植结构同化，导致玉米种植比例减少。大豆种植结构以 HH 型和 LL 型集聚为主，但在空间分布上与玉米具有一定的相反特征，拜泉县 HH 型大豆种植结构分布与 LL 型玉米种植结构分布基本相同，HH 型零星分布于克山各乡镇，LL 型则集中连片分布在依安县除红星乡以外的多数乡镇。LH 型大豆种植结构主要分布于 HH 型内部及边缘，HL 型则主要分布于 LL 型内部及边缘，HH 型和 LL 型大豆种植结构均有向内增加和向外扩张趋势，大豆种植的集中连片效应较明显（图 2）。

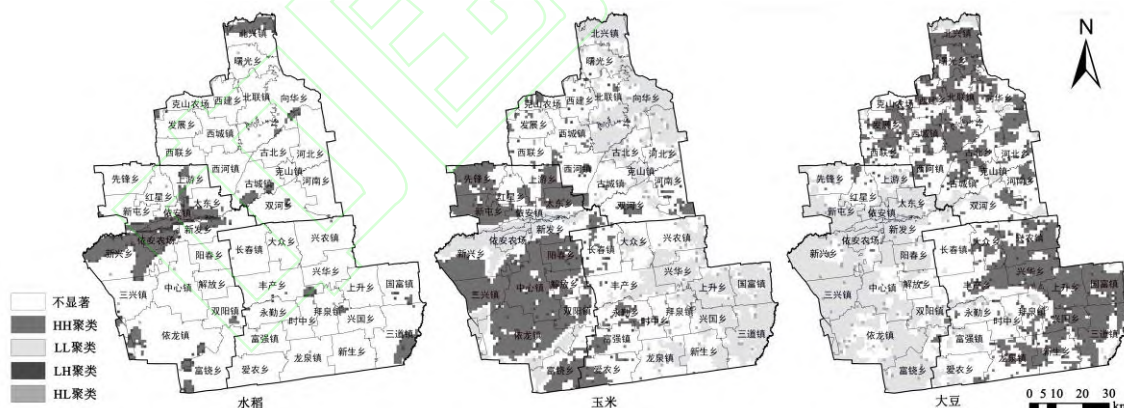


图 2 研究区主要粮食作物种植结构局部空间自相关分布

Fig.2 Local spatial autocorrelation distribution of planting structure of main food crops in the study area

3.2 耕地种植结构空间分异的影响因素分析

耕地种植结构的局部空间分异是自然、社会经济、市场、技术及政策等多因素共同作用的结果，由于研究区地域跨度不大，区域内农业种植技术水平相差不大，农业政策也基本一致，因此假设技术和政策因素对研究区内种植结构的影响无差异，不进行该影响因素分析。综合考虑耕地作物生长的必要条件、耕地利用条件和空间数据的可获取性，本文从气候条件、地形条件、土壤条件、管理条件和区位条件 5 个方面选取 17 个影响因子。为满足地理探测器对自变量类型的要求，对因子值进行离散化处理，结合作物的生长需求及各影响因素特点，

运用手动分类和自然断点法进行差别化的变量分类（表 2）。其中， X_{13} - X_{17} 空间计算方法为先生成要素栅格图，再运用 ArcGIS 工具箱生成每个像元到最近源的欧氏距离栅格图，最后以网格为单元统计各网格内要素的平均值。河流和沟渠为二调年度变更数据库中的线状及面状河流、沟渠数据，公路包括国道、省道、县道和乡道。

表 2 耕地种植结构影响因素的变量选取及分类

Tab.2 Variable and the classification of factors affecting cultivated land planting structure

类型	变量	指标说明与计算方法	分类
气候条件	生育期日均气温 X_1	统计各网格内日均温平均值	自然断点法分为 5 类
	生育期降水量 X_2	统计各网格内降水量平均值	自然断点法分为 5 类
	$\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 X_3	统计各网格内大于等于 10°C 积温平均值	5 类: $<2600^\circ\text{C}$; $2600\sim 2650^\circ\text{C}$; $2650\sim 2700^\circ\text{C}$; $2700\sim 2750^\circ\text{C}$; $>2750^\circ\text{C}$
地形条件	高程 X_4	统计各网格内高程平均值	自然断点法分为 5 类
	坡度 X_5	统计各网格内坡度平均值	自然断点法分为 5 类
	地貌类型 X_6	统计各网格内中心点地貌类型	依据地貌类型分类体系
土壤条件	土壤质地 X_7	统计各网格内中心点土壤质地类型	3 类: 黏土; 黏壤土; 壤土
	有效土层厚度 X_8	统计各网格内有效土层厚度平均值	6 类: $<25\text{cm}$; $25\sim 30\text{cm}$; $30\sim 35\text{cm}$; $35\sim 40\text{cm}$; $40\sim 45\text{cm}$; $>45\text{cm}$
	有机质含量 X_9	统计各网格内土壤有机质含量平均值	自然断点法分为 5 类
	速效钾含量 X_{10}	统计各网格内土壤速效钾含量平均值	自然断点法分为 5 类
	有效磷含量 X_{11}	统计各网格内土壤有效磷含量平均值	自然断点法分为 5 类
	pH 值 X_{12}	统计各网格内土壤 pH 值平均值	3 类: $5.5\sim 6.5$; $6.5\sim 7.5$; $7.5\sim 8.5$
管理条件	灌溉潜力 X_{13}	统计各网格距河流欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类
	排涝能力 X_{14}	统计各网格距沟渠欧氏距离平均值	自然断点法分为 10 类
	耕作便利度 X_{15}	统计各网格距居民点欧氏距离平均值	自然断点法分为 8 类
区位条件	市场区位 X_{16}	统计各网格距城镇欧氏距离平均值	自然断点法分为 8 类
	交通区位 X_{17}	统计各网格距公路欧氏距离平均值	自然断点法分为 5 类

3.2.1 单一因子对耕地种植结构的影响

各单一因子对水稻、玉米和大豆 3 种主要作物种植结构空间分异的影响存在较大差异，结果均通过了显著性检验（表 3~5）。

影响水稻种植结构空间分异的主导因子为高程（ X_4 ）和地貌类型（ X_6 ），影响程度（ q ）分别为 0.13 和 0.17，地貌类型对水稻种植结构空间分异的影响最大，说明水稻种植结构空间分布与地形条件密切相关。此外，土壤速效钾含量（ X_{10} ）、土壤有效磷含量（ X_{11} ）和排涝能力（ X_{14} ）对水稻种植结构也有一定影响，其他因子的影响程度较小。影响玉米种植结构空间分异的主导因子为生育期日均温（ X_1 ）、生育期降水量（ X_2 ）、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温（ X_3 ）、土壤速效钾含量（ X_{10} ）和土壤有效磷含量（ X_{11} ），其中生育期日均温对玉米种植结构空间分异的影响最大。高程（ X_4 ）、坡度（ X_5 ）、土壤有机质含量（ X_9 ）、土壤 pH 值（ X_{12} ）和灌溉潜力（ X_{13} ）对玉米种植结构也有一定影响，其他因子的影响程度较小。玉米种植结构的空間分异受气候影响最大，土壤条件也是重要的影响因素，但地形条件、管理条件和区位条件的影响程度相对较小。影响大豆种植结构空间分异的主导因子较多，各主要影响因子影响程度由大到小依次为：生育期日均温（ X_1 ）、高程（ X_4 ）、生育期降水量（ X_2 ）、土壤速效钾含量（ X_{10} ）、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温（ X_3 ）、土壤有效磷含量（ X_{11} ）、土壤 pH 值（ X_{12} ）、土壤有机质含量（ X_9 ）、地貌类型（ X_6 ），其他因子对大豆种植结构空间分异的影响程度都很小。气候和土壤是影响大豆种植结构空间分异的关键性因素，地形条件也对其产生一定影响，但

管理和区位条件的影响程度较小。

总体来看,气候和土壤是影响玉米和大豆种植结构的关键要素,区域水热条件和土壤肥力在很大程度上决定了该区域内玉米和大豆的种植比例。水稻种植结构则受地形影响最大,这与水稻种植的实际情况也较为相符,受地貌类型和坡度等地形要素的限制,研究区水稻种植比例较小。自然条件仍是耕地种植结构空间分异过程中的关键性影响要素。

3.2.2 因子交互作用对耕地种植结构的影响

在因子探测的基础上,对水稻、玉米和大豆种植结构空间分异的因子交互作用进行探测。双因子交互作用的影响均比单因子影响程度大,交互作用类型为双因子增强和非线性增强,不存在相互独立起作用的因子(表 3~5)。

(1) 对水稻种植结构的影响

水稻种植结构空间分异的因子交互作用探测结果表明,灌溉潜力(X_{13})对因子交互作用的影响最强,其他因子和灌溉潜力的交互作用均表现为非线性增强,其中,灌溉潜力与生育期日均温、生育期降水量($X_{13} \cap X_1$ 、 $X_{13} \cap X_2$)因子交互作用的 q 增长幅度较大。市场区位(X_{16})对因子交互作用的影响仅次于灌溉潜力。此外,管理条件和区位条件中的大部分因子与其他因子的交互作用也以非线性增强为主。高程(X_4)和地貌类型(X_6)两个地形因素对水稻种植结构空间分异的单一因子作用最强,但与其他因子的交互作用以双因子增强为主,其中地貌类型与有效磷($X_6 \cap X_{11}$)的交互作用在众多因子交互作用中对水稻种植结构空间分异的影响最大, q 为0.24。可以看出,气候条件、土壤条件、管理条件及区位条件中因子的交互作用对水稻种植结构空间分异的影响与单一因子影响相比均大幅度增强,而地形条件中各因子与其他因子交互作用的影响增幅相对较小,说明地形是仍是影响水稻种植结构的决定性因素。

(2) 对玉米种植结构的影响

玉米种植结构空间分异的因子交互作用探测结果表明,市场区位(X_{16})和交通区位(X_{17})两个区位因素对因子交互作用的影响最强,与其他因子的交互作用均表现为非线性增强。坡度(X_5)、地貌类型(X_6)、排涝能力(X_{14})和耕作便利度(X_{15})对因子交互作用的影响仅次于市场区位和交通区位。坡度与生育期日均温($X_5 \cap X_1$)交互作用在众多因子交互作用中对玉米种植结构空间分异的影响最大, q 为0.36。土壤条件各因子与气候条件各因子的交互作用以双因子增强为主。可以看出,地形与气候因素的交互作用对玉米种植结构空间分异的影响最大,管理和区位条件中各因子与其他因子的交互作用对玉米种植结构空间分异影响的解释力明显增强。说明区位因素与自然因素的综合作用大大增加了玉米种植结构空间分异的影响程度,良好的管理和区位条件可在一定程度上提升玉米种植优势,有助于增加玉米种植比例。

(3) 对大豆种植结构的影响

大豆种植结构空间分异的因子交互作用探测结果与水稻和玉米的差异较大,其因子交互作用以双因子增强为主。市场区位(X_{16})对因子交互作用的影响较强,与气候、地形、管理及部分土壤因素的因子交互作用均表现为非线性增强,灌溉潜力对因子交互作用的影响强度仅次于市场区位。其他因子之间的交互作用以双因子增强为主,其中,生育期日均温与地貌类型($X_1 \cap X_6$)的因子交互作用在众多因子交互作用中对大豆种植结构空间分异的影响最大, q 高达0.4。可以看出,单一因子对大豆种植结构空间分异的影响较为明显,因子交互作用对大豆种植结构空间分异的影响程度提升不大。

表 3 研究区水稻种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab.3 Interactive detection results of spatial differentiation of rice planting structure in the study area

	气候条件			地形条件				土壤条件				管理条件			区位条件		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
X ₁	0.04																
X ₂	0.06	0.05															
X ₃	0.05	0.08	0.04														
X ₄	0.15	0.14	0.14	0.13													
X ₅	0.10	0.13	0.10	0.18	0.05												
X ₆	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.17											
X ₇	0.04	0.06	0.04	0.13	0.07	0.17	0.00										
X ₈	0.09	0.10	0.08	0.16	0.09	0.20	0.04	0.03									
X ₉	0.08	0.11	0.06	0.15	0.09	0.19	0.04	0.08	0.03								
X ₁₀	0.14	0.17	0.13	0.20	0.13	0.23	0.09	0.10	0.09	0.09							
X ₁₁	0.15	0.17	0.14	0.22	0.12	0.24	0.09	0.11	0.10	0.11	0.08						
X ₁₂	0.05	0.06	0.04	0.14	0.08	0.18	0.02	0.07	0.03	0.09	0.09	0.02					
X ₁₃	0.10	0.15	0.08	0.19	0.08	0.21	0.03	0.06	0.08	0.11	0.11	0.07	0.02				
X ₁₄	0.11	0.12	0.12	0.17	0.13	0.21	0.09	0.11	0.10	0.16	0.15	0.10	0.11	0.08			
X ₁₅	0.08	0.10	0.09	0.15	0.09	0.19	0.04	0.07	0.09	0.13	0.12	0.07	0.07	0.12	0.04		
X ₁₆	0.11	0.10	0.07	0.16	0.07	0.21	0.02	0.06	0.07	0.13	0.12	0.05	0.06	0.10	0.06	0.01	
X ₁₇	0.06	0.08	0.06	0.13	0.07	0.18	0.03	0.06	0.06	0.11	0.11	0.04	0.06	0.11	0.06	0.05	0.02

表 4 研究区玉米种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab.4 Interactive detection results of spatial differentiation of corn planting structure in the study area

	气候条件			地形条件				土壤条件				管理条件			区位条件		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
X ₁	0.23																
X ₂	0.25	0.20															
X ₃	0.25	0.25	0.12														
X ₄	0.28	0.26	0.16	0.09													
X ₅	0.36	0.33	0.25	0.23	0.09												
X ₆	0.33	0.30	0.17	0.18	0.11	0.01											
X ₇	0.24	0.21	0.15	0.11	0.11	0.03	0.02										
X ₈	0.26	0.23	0.16	0.13	0.15	0.07	0.06	0.05									
X ₉	0.25	0.23	0.18	0.16	0.21	0.14	0.13	0.19	0.10								
X ₁₀	0.31	0.31	0.24	0.23	0.27	0.22	0.20	0.27	0.26	0.19							
X ₁₁	0.33	0.31	0.25	0.25	0.27	0.23	0.24	0.27	0.24	0.26	0.19						
X ₁₂	0.24	0.22	0.15	0.14	0.21	0.15	0.15	0.19	0.12	0.25	0.20	0.11					
X ₁₃	0.28	0.26	0.20	0.21	0.16	0.11	0.11	0.14	0.16	0.24	0.22	0.17	0.08				
X ₁₄	0.25	0.22	0.14	0.11	0.10	0.03	0.03	0.06	0.11	0.21	0.21	0.12	0.10	0.01			
X ₁₅	0.32	0.29	0.20	0.17	0.11	0.07	0.06	0.09	0.16	0.23	0.24	0.16	0.13	0.06	0.04		
X ₁₆	0.28	0.24	0.17	0.14	0.10	0.03	0.03	0.08	0.12	0.21	0.21	0.13	0.12	0.03	0.06	0.01	
X ₁₇	0.26	0.24	0.16	0.10	0.10	0.03	0.02	0.07	0.12	0.21	0.22	0.13	0.09	0.01	0.05	0.03	0.00

表 5 研究区大豆种植结构空间分异的因子交互作用探测结果

Tab.5 Interactive detection results of spatial differentiation of soybean planting structure in the study area

	气候条件			地形条件			土壤条件				管理条件			区位条件			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
X ₁	0.34																
X ₂	0.36	0.28															
X ₃	0.35	0.34	0.23														
X ₄	0.39	0.40	0.35	0.33													
X ₅	0.39	0.33	0.27	0.35	0.06												
X ₆	0.41	0.35	0.31	0.34	0.19	0.17											
X ₇	0.34	0.29	0.24	0.33	0.07	0.19	0.01										
X ₈	0.37	0.31	0.26	0.34	0.10	0.20	0.05	0.04									
X ₉	0.37	0.36	0.29	0.35	0.23	0.28	0.20	0.27	0.19								
X ₁₀	0.38	0.37	0.31	0.36	0.27	0.32	0.23	0.24	0.26	0.23							
X ₁₁	0.37	0.35	0.30	0.36	0.25	0.30	0.21	0.24	0.25	0.25	0.21						
X ₁₂	0.35	0.33	0.26	0.34	0.25	0.29	0.21	0.24	0.21	0.24	0.22	0.19					
X ₁₃	0.36	0.32	0.24	0.34	0.10	0.20	0.05	0.08	0.21	0.26	0.24	0.22	0.03				
X ₁₄	0.36	0.30	0.27	0.33	0.10	0.19	0.06	0.09	0.21	0.26	0.23	0.22	0.08	0.05			
X ₁₅	0.37	0.31	0.26	0.35	0.09	0.19	0.05	0.08	0.23	0.27	0.25	0.23	0.08	0.09	0.04		
X ₁₆	0.36	0.31	0.25	0.35	0.08	0.20	0.03	0.07	0.21	0.24	0.22	0.21	0.06	0.08	0.06	0.02	
X ₁₇	0.35	0.29	0.24	0.33	0.09	0.19	0.05	0.08	0.21	0.25	0.22	0.21	0.07	0.09	0.07	0.06	0.04

4 讨论

针对当前研究较少关注微观地理尺度下多因素交互作用对耕地种植结构空间分异的影响,本文以 1km² 地理网格作为研究的空间尺度,揭示多种耕地利用空间要素交互作用下耕地种植结构的时空分异特征及影响机理,以丰富种植结构空间分异的相关研究,为耕地种植结构优化调整提供一定依据。

通过研究发现,地形条件是导致水稻种植结构空间分异的关键性因素,水稻特殊的生长特点导致其对地形的要求较高,研究区坡度及地貌类型条件在一定程度上限制了水稻种植。地形不仅通过地势起伏的物理特征影响水稻种植,也可以对水分和热量再分配,以及影响地表物质的迁移和生态环境的演替改变土壤理化性质^[20],进而影响水稻种植。水资源对水稻种植的作用不可忽视,结果显示,灌溉潜力与其他因子的交互作用对水田分布的影响程度提升最为明显。气候因素对玉米和大豆种植结构的时空分异起主导作用,对比作物种植适宜性标准发现,研究区的气温、降水及积温等条件对玉米和大豆的种植均不具有限制作用,但不同水热条件下作物的光温生产潜力不同,将导致粮食产量存在差异^[21],进而影响粮食产值及收益的区域差异,这是导致玉米和大豆种植结构空间分异的重要原因。从因子交互作用结果可以看出,管理和区位条件中各因子与其他因子的交互作用对玉米种植结构空间分异的影响程度明显增强,但对大豆种植结构空间分异的影响程度提升不大。因此,在考虑单一气候和土壤因子的同时,可通过市场区位和交通区位等社会经济因素的空间选择,调整玉米布局及种植结构。大豆种植结构空间分布则更依赖于单一因子的影响,主要通过气候、地形和土壤等自然因素中单一因子的空间选择调整大豆布局及种植结构。

耕地种植结构的影响因素可从空间维度和时间维度两方面阐释,本文仅是基于空间截面数据,探究微观尺度空间差异下各因素对耕地种植结构的影响,未考虑时间变化下耕地种植结构的演变规律及影响因素。不同时期及社会背景下的耕地种植结构具有明显差异,探究时间维度下的耕地种植结构影响因素,将有助于更好地揭示社会经济发展、农业科技进步、政策等因素对种植结构空间分异的影响。因此,耦合时间和空间维度的耕地种植结构影响因素,进而更全面地揭示耕地种植结构时空变化的影响机理将是下一步深入探究的重点。

5 结论

(1) 研究区耕地种植结构类型以单一大豆型、单一玉米型和玉米-大豆型为主,单一水稻型和大豆-玉米-水稻型为次要类型,大豆-水稻型和水稻-玉米型种植结构比例较小。其中依安县种植结构类型主要为单一玉米型和单一水稻型,克山县和拜泉县种植结构类型则以单一大豆型为主。各类作物种植结构的空間集聚性特征存在一定差异,水稻以 HH 型为主,玉米和大豆以 HH 型和 LL 型为主, LH 型主要分布于 HH 型内部或边缘, HL 型主要分布于 LL 型内部或边缘, HH 型和 LL 型种植结构具有一定的向内增加或向外扩张趋势,产生作物种植的集中连片效应。

(2) 各单一因子对不同耕地作物种植结构空间分异的影响存在一定差异。影响水稻种植结构空间分异的主导因子为高程和地貌类型,影响玉米种植结构空间分异的主导因子为生育期日均温、生育期降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、土壤速效钾含量和土壤有效磷含量,大豆种植结构空间分异主要受生育期日均温、高程、生育期降水量、土壤速效钾含量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、土壤有效磷含量、土壤 pH 值、土壤有机质含量和地貌类型影响。玉米和大豆种植结构的空間分异主要受气候条件和土壤条件影响,水稻种植结构则受地形条件影响最大,而管理条件和区位条件中各因子的影响相对较小,自然条件仍是耕地种植结构空间分异过程中的关键性影响要素。

(3) 因子交互作用对研究区耕地种植结构空间分异的影响程度均大于单因子,交互作用类型为双因子增强和非线性增强。因子交互作用对不同作物种植结构空间分异影响的提升程度存在明显差异。灌溉潜力与其他因子的交互作用对水稻种植结构空间分异的影响明显增强,对于玉米,区位条件对因子交互作用的影响最为明显,而因子交互作用对大豆种植结构空间分异的影响程度提升不大。

参 考 文 献

- [1] 唐惠燕,包平. 基于 GIS 江苏水稻种植面积与产量的空间重心变迁研究 [J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2014, 14(1): 118-124.
TANG Huiyan, BAO Ping. Space gravity changes of Jiangsu rice acreage and yield based on GIS [J]. Journal of Nanjing Agricultural University(Social Sciences Edition), 2014, 14(1): 118-124. (in Chinese)
- [2] 胡琼,吴文斌,宋茜,等. 农作物种植结构遥感提取研究进展 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1900-1914.
HU Qiong, WU Wenbin, SONG Qian, et al. Recent progresses in research of crop patterns mapping by using remote sensing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(10): 1900-1914. (in Chinese)
- [3] 王佳月,辛良杰. 基于 GlobeLand30 数据的中国耕地与粮食生产的时空变化分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 1-8.
WANG Jiayue, XIN Liangjie. Spatial-temporal variations of cultivated land and grain production in China based on GlobeLand30 [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 1-8. (in Chinese)
- [4] 倪学志,于晓媛. 耕地轮作、农业种植结构与我国持久粮食安全 [J]. 经济问题探索, 2018(7): 78-8.
NI Xuezhi, YU Xiaoyuan. Cultivated land rotation, agricultural planting structure and China's lasting food security [J]. Inquiry into Economic Issues, 2018(7): 78-8. (in Chinese)
- [5] 赵丹丹,周宏. 农户分化背景下种植结构变动研究——来自全国 31 省农村固定观察点的证据 [J]. 资源科学, 2018, 40(1): 64-73.
ZHAO Dandan, ZHOU Hong. Study on cropping structure adjustment under the background of rural-household differentiation from Rural Fixed Watch Points in 31 provinces of China [J]. Resources Science, 2018, 40(1): 64-73. (in Chinese)

- [6] 董非非, 刘爱民, 封志明, 等. 大豆传统产区种植结构变化及影响因素的定量化评价——以黑龙江省嫩江县为例 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 40-49.
DONG Feifei, LIU Aimin, FENG Zhiming, et al. Changes of planting structure and quantitative evaluation of influencing factors in traditional soybean producing areas:taking Nenjiang County in Heilongjiang Province as an example [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 40-49. (in Chinese)
- [7] 吕东辉, 徐彩芬, 张郁. 价格波动对黑龙江省种植结构影响的模拟分析 [J]. 农业技术经济, 2019(12): 96-106.
LÜ Donghui, XU Caifen, ZHANG Yu. Simulation analysis of price fluctuation on the influence of planting structure in Heilongjiang Province [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019(12): 96-106. (in Chinese)
- [8] 洪炜杰, 罗必良. 农地产权安全性对农业种植结构的影响 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2019(3): 32-40, 159-160.
HONG Weijie, LUO Biliang. How do land rights affect agricultural planting structure? [J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition), 2019(3): 32-40, 159-160. (in Chinese)
- [9] 钱龙, 袁航, 刘景景, 等. 农地流转影响粮食种植结构分析 [J]. 农业技术经济, 2018(8): 63-74.
QIAN Long, YUAN Hang, LIU Jingjing. Does transfer of farmland affect grain planting structure? [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018(8): 63-74. (in Chinese)
- [10] 叶初升, 马玉婷. 人力资本及其与技术进步的适配性何以影响了农业种植结构? [J]. 中国农村经济, 2020(4): 34-55.
YE Chusheng, MA Yuting. How do human capital and its adaptability to technology progress affect agricultural planting structure? [J]. Chinese Rural Economy, 2020(4): 34-55. (in Chinese)
- [11] 刘琼, 肖海峰. 农地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响 [J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1063-1073.
LIU Qiong, XIAO Haifeng. The impact of farmland management scale and fiscal policy for supporting agriculture on agricultural carbon emission [J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1063-1073. (in Chinese)
- [12] 吴清华, 李谷成, 周晓时, 等. 基础设施、农业区位与种植业结构调整——基于 1995—2013 年省际面板数据的实证 [J]. 农业技术经济, 2015(3): 25-32.
WU Qinghua, LI Gucheng, ZHOU Xiaoshi, et al. Adjustment of infrastructure, agricultural location and planting structure:an empirical study based on provincial panel data from 1995 to 2013 [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015(3): 25-32. (in Chinese)
- [13] 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 202-211.
BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and its correlation analysis with groundwater in large irrigation area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 202-211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160929&journal_id=jcsam.DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029.(in Chinese)
- [14] 万炜, 李含微, 王佳莹, 等. 基于空间平滑法的旱作区粮食产量时空变化与影响因素研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 284-296.
WAN Wei, LI Hanwei, WANG Jiaying, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of grain yield based on spatial smoothing method in dryland farming regions [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 284-296. (in Chinese)
- [15] 张文琦, 宋戈. 三江平原典型区水田时空变化及驱动因素分析 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 244-252.
ZHANG Wenqi, SONG Ge. Spatial-temporal variations and driving factor analysis of paddy fields in typical regions of Sanjiang Plain [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 244-252. (in Chinese)
- [16] 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究 [J/OL]. 农业机械学报,

- 2017, 48(5): 142-151.
- ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in the typical basin of Sanjiang Plain [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 142-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170517&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.017. (in Chinese)
- [17] 董光龙, 赵轩, 刘金花, 等. 基于耕地质量评价与空间集聚特征的基本农田划定研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 133-142.
- DONG Guanglong, ZHAO Xuan, LIU Jinhua, et al. Prime cropland assignment based on cultivated land quality evaluation and spatial cluster pattern[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 133-142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.015. (in Chinese)
- [18] 刘珍环, 杨鹏, 吴文斌, 等. 近 30 年中国农作物种植结构时空变化分析 [J]. 地理学报, 2016, 71(5): 840-851.
- LIU Zhenhuan, YANG Peng, WU Wenbin, et al. Spatio-temporal changes in Chinese crop patterns over the past three decades [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 840-851. (in Chinese)
- [19] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [20] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究 [J]. 资源科学, 2013, 35 (12): 2434-2443.
- DENG Ouping, ZHOU Xi, HUANG Pingping, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan [J]. Resources Science, 2013, 35(12): 2434-2443. (in Chinese)
- [21] 蔺涛, 谢云, 刘刚, 等. 黑龙江省气候变化对粮食生产的影响 [J]. 自然资源学报, 2008(2): 307-318.
- LIN Tao, XIE Yun, LIU Gang, et al. Impact of climate change on crop yields in Heilongjiang Province [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 307-318. (in Chinese)