doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.012

# 粮食主产区河南省耕地撂荒特征与影响因素分析

周丁扬[1]　吴建桥[1]　文　雯[2]　姜广辉[1]　李雨凌[1]　李广泳[3]

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;2.河南省土地整理中心,郑州 450016;
3.国家基础地理信息中心,北京 100830)

**摘要**:准确把握粮食主产区耕地撂荒特征及其影响因子,对保障粮食安全、强化耕地保护具有重要意义。以河南省为例,在识别撂荒耕地分布的基础上,通过构建撂荒程度指数刻画了撂荒总体特征及其空间分布,并运用地理探测器方法揭示了县域尺度耕地撂荒的形成机制。结果表明:2015 年河南省耕地撂荒面积为 174 419.46 $hm^2$,整体撂荒率为 2.15%;全省 158 个县域中均存在不同程度的耕地撂荒现象,撂荒耕地的空间分布总体呈倒"T"字型格局。河南省耕地撂荒受多重因素共同作用,其中人口外流为直接因素,耕地破碎化等生产条件制约为间接因素,而农业生产收益较低为根本因素。根据撂荒地域分异特征,将研究区归纳为人口条件约束型区域、生产条件约束型区域和经济条件约束型区域 3 种,提出应因地制宜,采取有序推进农地流转、强化高标准农田建设、实行经济激励等方式促进耕地的合理有效利用。

**关键词**:耕地撂荒;空间格局;影响因子;地理探测器;粮食主产区;河南省

**中图分类号**:F301.21;P962　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0127-11　　**OSID**:

# Abandonment Characteristics and Influencing Factors of Cultivated Land Abandonment in Major Crop-producing Areas

ZHOU Dingyang[1]　WU Jianqiao[1]　WEN Wen[2]　JIANG Guanghui[1]　LI Yuling[1]　LI Guangyong[3]

(1. *Faculty of Geographical Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
2. *Henan Land Consolidation and Rehabilitation*, *Zhengzhou* 450016, *China*
3. *National Geomatics Center of China*, *Beijing* 100830, *China*)

**Abstract**: Accurately grasping the characteristics and influencing factors of cultivated land abandonment in major grain producing areas is significant for ensuring food security and strengthening cultivated land protection. Henan Province was taken as the research area. Based on the identification of the distribution of abandoned farmland, an abandonment degree index was proposed to describe the overall characteristics and spatial distribution of abandoned land. At the same time, the Geodetector model was used to reveal the formation mechanism of farmland abandonment at the county scale. Results showed that in 2015, the abandoned land area in Henan Province was 174 419.46 $hm^2$, and the overall abandoned rate was about 2.15%. There were different degrees of abandoned land in 158 counties of the province. The spatial distribution of abandoned farmland was generally in an inverted "T" pattern. The cultivated land abandonment in Henan Province was affected by many factors, among which the outflow of population was the direct factor, the fragmentation of cultivated land was the indirect factor, and the low income of agricultural production was the fundamental factor. According to the characteristics of abandoned land, the research area was classified into three types: population constrained area, production condition constrained area, and economic condition constrained area. It was necessary to adopt orderly measures to promote the transfer of agricultural land according to local conditions, strengthen construction of high-standard farmland, and implement economic incentives. Thus the rational and effective use of cultivated land could be promoted.

**Key words**: abandonment of cultivated land; spatial pattern; influencing factors; Geodetector; major crop-producing areas; Henan Province

收稿日期:2020-09-28　修回日期:2020-11-09

**基金项目**:河南省自然资源厅自然资源科研项目(2019-319-9)

**作者简介**:周丁扬(1984—),女,副教授,博士,主要从事土地可持续利用研究,E-mail:zhoudy@bnu.edu.cn

**通信作者**:姜广辉(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事土地评价、规划与可持续利用研究,E-mail:macrophage@bnu.edu.cn

## 0 引言

耕地撂荒是一种全球性的农业景观现象,最早发生在欧洲[1],并在过去半个多世纪呈全球性扩散态势。耕地撂荒不仅改变土地利用强度和土地覆被状况[2],同时还对土壤养分、地表径流、地表反照率和陆地碳汇等产生影响,进而引起生物多样性和生态环境的改变[3]。更为重要的是,由于粮食生产受耕地资源约束,在技术和资本不能完全替代的情况下,撂荒致使耕地面积减少不仅会对粮食产量造成影响,大规模撂荒更有可能对区域粮食安全构成威胁[4]。目前,耕地撂荒作为影响生态环境和粮食安全的重要土地利用现象,已引起学术界和政策制定者的广泛关注[5-6]。

耕地撂荒的特征识别及其成因是撂荒研究领域的重要内容,也是国家制定相应政策的必要基础信息。近年来,各国学者相继运用遥感影像或实地调研对全球各地耕地撂荒特征及其形成机制进行了不同尺度的识别和研究,结果显示,欧洲、美国、澳大利亚及日本等发达国家是耕地撂荒分布最为广泛的地区[7-8]。欧美国家耕地撂荒主要与市场需求下降[9]、农业经济转型[10]、体制变革[11]、土地肥沃程度[12]和气候条件[13]等因素有关;日本的耕地撂荒主要与人口老龄化及人口流失等因素有关[14];而在快速工业化和城市化的发展中国家,如菲律宾、尼泊尔、泰国等,耕地撂荒则受务农机会成本上升[15]、土地边际化[16-17]、农业劳动力不足[18]和相关政策失灵[15]等因素影响显著。综合而言,耕地撂荒主要受宏观层面的社会经济要素变化和区域自然环境因素的影响[3],同时城镇化和工业化发展也被认为是许多地区耕地撂荒的最根本驱动力[19]。耕地撂荒是一种比较复杂的社会现象,往往受多种影响因素的综合作用,不同学者对不同地域的研究所揭示的撂荒原因也不尽相同,且重要性差别较大[20]。

纵观国内的相关研究,多数以单个小尺度的村镇或区县为研究对象,一般采用实地调查和遥感影像解译分析耕地撂荒时空特征,研究区域主要集中于重庆[21-22]、甘肃[23]、陕西[24]等地形比较复杂、农业生产条件较差的山区[5];同时多以农户调查为基础,运用计量分析揭示该地区耕地撂荒的影响因素,主要包括农业生产效益低、劳动力不足、农业生产条件差、土地政策限制等[25-26]。受数据来源所限,较大尺度区域内耕地撂荒空间特征的研究相对薄弱,对影响因素与机制的分析也较为浅显。仅有部分学者将土地利用数据或遥感影像数据应用到较大尺度的撂荒地识别中[27],并利用统计数据对黑龙江、江西等省份的撂荒驱动因子进行分析[28-29],但识别结果未体现地市间差异或仅针对局部地市。还有学者运用抽样调查、荟萃分析等方法推测全国耕地的撂荒现状[30-31],但受抽样方法和样本限制,在一定程度上限制了对撂荒空间特征和影响因素的认识。因此,多尺度、多地区、多方法探究耕地撂荒特征及其影响因素可以丰富对我国撂荒整体态势的分析与判断。

2000 年后,随着我国工业化、城镇化进程的快速推进,耕地撂荒现象开始大量出现[32]。数据显示,全国每年撂荒的耕地近 200 万 $hm^2$。粮食主产区是我国粮食生产的重要基地,对保障国家粮食安全和巩固农业基础具有重要的战略地位。耕地是粮食主产区的宝贵资源,且粮食生产和需求不稳定、不确定因素增多,耕地保护与粮食安全面临着新问题和新挑战,更需要对此类耕地保障需求较高地区的撂荒问题作出整体判断。河南省是我国重要的粮食主产区之一,准确把握其耕地撂荒分布特征、定量探究耕地撂荒的影响因子,对保障粮食安全、缓解人地矛盾具有重要意义。基于此,本研究以粮食主产区河南省为研究区,利用土地变更调查数据、地理国情普查数据,以县域为研究单元刻画 2015 年耕地撂荒特征,并运用地理探测器定量识别各地市撂荒主导影响因子,揭示研究区耕地撂荒的形成机制,并划分撂荒地域分异类型,为推动粮食主产区藏粮于地、藏粮于技,因地制宜保护和提高粮食综合生产能力提供参考依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

河南省位于华北平原南部的黄河中下游地区(图 1),地势西高东低;北、西、南三面由太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布;中、东部为黄淮海冲积平原,西南部为南阳盆地。河南省农耕历史悠久,耕地面积约占全省面积的 49%,粮食产量占全国产量的 9.67%,是我国第二大粮食主产区,呈现人口众多、区域发展差异大、人均耕地数量少的特点。截至 2015 年全省人口已突破 1 亿,人均耕地面积仅为 0.085 $hm^2$,低于全国 0.09 $hm^2$/人水平线,耕地资源相对稀缺。目前研究区耕地除因基础设施建设占用致使耕地显性流失外,还面临由于撂荒产生的耕地面积虽未减少,但产出能力衰减的隐性流失。

### 1.2 数据来源

根据撂荒地内涵界定,结合土地变更调查数据和地理国情普查数据,以河南省 158 个县级行政区

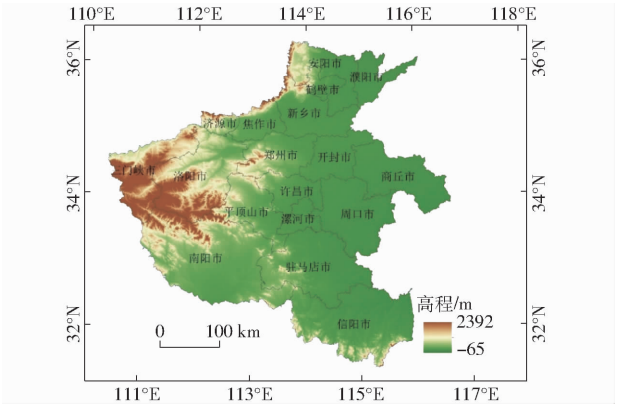


图 1　河南省行政区划图

Fig. 1　Division of Henan Province

为研究单元提取了耕地撂荒规模。撂荒影响因素数据来自河南省 2015 年农用地分等定级更新调查成果、《河南省统计年鉴 2015》、第六次人口普查与抽样调查数据库，因相关指标只涉及市辖县，故形成机制部分剔除市辖区后共 106 个县级研究单元。

## 2　研究方法

### 2.1　撂荒地提取

耕地撂荒也称“抛荒”，是指土地原本具备耕种条件，但是承包经营耕地的单位或农户不进行耕种，致使土地闲置荒芜的现象。本文采用 2011 年土地整理与土地储备国际研讨会界定的：“没有使用的可耕地”“2 年或 2 年以上没有耕种的农地”“没有时间限制的很长时间处于撂荒的可耕地”为撂荒地[1]，不含对耕地劳动力、资金等的投入减少，使耕地处于未充分利用状态的隐性撂荒。

以往对撂荒耕地的识别大多源自对农户层面的调查问卷结果或在县市级以下尺度对遥感影像进行解译，方法具有一定的局限性，解译准确性不能保证。本文将土地利用类型虽仍为耕地但未见耕种致使荒芜的土地确定为撂荒耕地，结合土地变更调查数据和地理国情普查数据进行撂荒耕地识别。土地变更调查是在土地利用现状调查的基础上，更新土地利用现状图，用于汇总查清各类土地的结构、分布和利用现状等，是中国各省、市、区、县土地资源存量和通量的直观反映[33]。地理国情普查对象包括地表形态、地表覆盖分类、地理国情要素 3 方面，其中地表覆盖分类信息反映地表自然营造物和人工建造物的自然属性状况，具有客观性、公正性、高精度的特点。两类数据具有一定的独立性，也具有很强的互补性，结合使用具有互相校核、相互补充的作用。已有研究表明，耕地在两类数据的叠加分析中重合率最高[34]。因此，通过对土地调查和地理国情普查两种数据的空间叠加，可以准确定位耕地撂荒的情况[35]。

利用 2012 年全国土地变更调查与遥感监测形成的土地利用现状数据，分类体系为 GB/T 21010—2007《土地利用现状分类》；地理国情普查数据采用分辨率为 0.5 m 遥感影像生成，分类体系为 GDPJ 01—2013《地理国情普查内容与指标》。研究先以 2012 年土地变更调查数据“DLTB”层的 01 类耕地为基准空间范围，将 2015 年地理国情普查数据统一到 1980 西安平面坐标系统下，叠加两类数据，进而基于 GDPJ 01—2013《地理国情普查内容与指标》，识别出基准空间范围内“LCA”层土地覆被由耕地转变为草地（地类代码为 0411、0412、0413）、荒漠与裸露地表（地类代码为 0910、0920、0930、0940、0950）的地块，即形成 2015 年河南省撂荒耕地分布矢量斑块。最后借助同年 Google Earth 卫星影像，将随机挑选出的撂荒地块对应到遥感影像上，按照大小、形状、阴影、颜色、纹理、图案、位置及周围系统的解译 8 要素对目标地块进行目视解译，通过对研究区内 158 个区县的 316 个撂荒地块进行验证，准确率达到 86.39%。

### 2.2　撂荒程度指数测定

分别运用撂荒面积和撂荒率刻画河南省耕地撂荒的基本情况，撂荒率为撂荒耕地面积占原有耕地面积百分比。同时，为了全面综合反映撂荒特征，提出了撂荒程度指数的概念，运用内梅罗公式将撂荒面积与撂荒率分别标准化后进行合成，该指标兼顾二者的综合影响。撂荒程度指数计算公式为

$$P_i = \sqrt{\frac{H_i^2 + M_i^2}{2}} \tag{1}$$

其中

$$H_i = \frac{h_i - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \tag{2}$$

$$M_i = \frac{m_i - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \tag{3}$$

式中　$P_i$——$i$ 区县的撂荒程度指数

$H_i$——标准化后 $i$ 区县的撂荒率

$M_i$——标准化后 $i$ 区县的撂荒面积

$h_i$、$m_i$——$i$ 区县撂荒率、撂荒面积的原始值

$h_{\max}$、$h_{\min}$——所有区县撂荒率的最大值、最小值

$m_{\max}$、$m_{\min}$——所有区县撂荒面积的最大值、最小值

为了直观表现撂荒特征，根据河南省 158 个区县撂荒率、撂荒面积、撂荒程度指数的数据分布特征（图 2），先将超高数值归入最高等级，再运用等分法将 3 类数据各划分 4 等来刻画区域抛荒程度，其中撂荒面积分为 Ⅰ 级（[0, 667 $hm^2$]）、Ⅱ 级

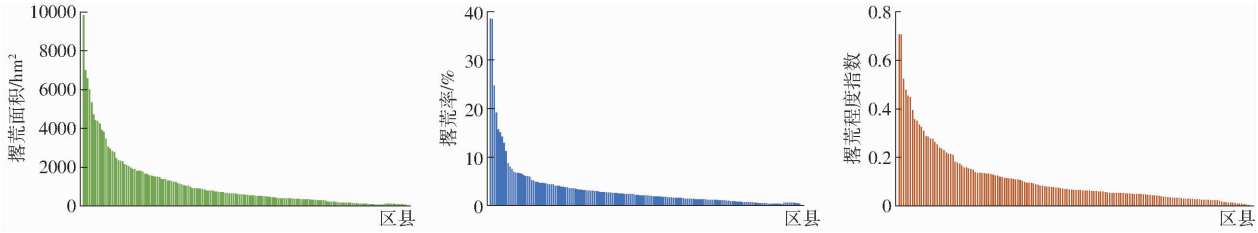


图 2 撂荒面积、撂荒率、撂荒程度指数分布

Fig. 2 Distributions of abandoned area, abandoned rate and abandoned degree index

((667 hm²,1 334 hm²])、Ⅲ级((1 334 hm²,2 000 hm²])、Ⅵ级((2 000 hm²,9 828 hm²]);撂荒率分为Ⅰ级([0, 1.75%])、Ⅱ级((1.75%, 3.50%])、Ⅲ级((3.50%, 5.25%])、Ⅵ级((5.25%,38.6%]);撂荒程度指数分为轻度撂荒([0,0.06])、低度撂荒((0.06,0.12])、中度撂荒((0.12,0.18])、重度撂荒((0.18,0.74])。

### 2.3 影响因素分析方法

#### 2.3.1 地理探测器原理

耕地撂荒是一个复杂的过程,已有撂荒驱动力的研究多采用传统计量模型,注重单个因子对撂荒的影响,很少关注多个因子的交互作用。地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,可以用来分析各种现象的影响因子以及多因子交互作用[36]。本文采用地理探测器方法,以县域为研究单元探测河南全省耕地撂荒的影响因素。由于影响因子存在明显的地域分异,再对各地市内部进行多级探测,根据解释力进行撂荒地域划分。其中单个因子对撂荒的解释程度用 $q$ 度量,计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2}\sum_{h=1}^{L} n_h \sigma_h^2 \tag{4}$$

式中 $n$——样本量

$\sigma^2$——方差

$n_h$——第 $h$ 层样本量

$\sigma_h^2$——第 $h$ 层方差

$q$ 取值范围为[0,1],数值越大表明影响因子对撂荒的解释力越强,反之越弱。

地理探测器的核心假设基于:如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。地理探测器擅长分析类型量,交互探测的原理是先对所有数据分别进行离散化处理达到分层目的,计算两种因子 $x_1$ 和 $x_2$ 各自对 $Y$ 的 $q$ 值:$q(x_1)$ 和 $q(x_2)$。进而计算两因子交互项的 $q$ 值,识别方法是将两种因子叠加后各图层相切所形成的多边形分布定义为交互项($x_1 \cap x_2$),将此交互项作为新的自变量带入回归模型,计算其对因变量分布的解释程度,$q$ 值记为:$q(x_1 \cap x_2)$,最后对 $q(x_1)$、$q(x_2)$ 与 $q(x_1 \cap x_2)$ 进行比较,结果可分为以下几类:若 $q(x_1 \cap x_2) < \mathrm{Min}(q(x_1), q(x_2))$,说明 $x_1$ 和 $x_2$ 交互后非线性减弱;若 $\mathrm{Min}(q(x_1), q(x_2)) < q(x_1 \cap x_2) < \mathrm{Max}(q(x_1), q(x_2))$,说明交互后单因子非线性减弱;若 $q(x_1 \cap x_2) > \mathrm{Max}(q(x_1), q(x_2))$ 且 $q(x_1 \cap x_2) < q(x_1) + q(x_2)$,说明 $x_1$ 和 $x_2$ 为双因子增强;若 $q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$,说明因子 $x_1$ 和 $x_2$ 相互独立;若 $q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$,说明 $x_1$ 和 $x_2$ 交互后非线性增强[36]。

#### 2.3.2 影响因素选择

耕地撂荒是一种在城镇化、工业化引发的农村人口外流背景下,农户基于自身耕地生产条件,权衡务农与务工收益后的行为决策。其受到人口、社会经济、生产条件等多种因素的共同影响,撂荒格局的形成过程与区域经济发展和产业结构调整背景下的农业劳动力析出基本同步[6]。一般而言在人口因素方面,劳动力数量越少、老龄化程度越严重,撂荒可能性越高[21,37];在社会经济方面,城镇化水平越高、农民收入越多,撂荒可能性越高[20];在生产条件方面,经营管理水平越差,如农业资金投入低、机械化程度低、耕地质量越差、地块破碎度越高等,则撂荒可能性越高[38]。

基于上述文献梳理并结合河南省实际情况,本文从人口、社会经济和生产条件 3 方面,分别选取人口自然增长率 $X_1$、人口外流数量 $X_2$、65 岁以上人口占比 $X_3$ 代表人口因素,选取农民人均纯收入 $X_4$、城镇化率 $X_5$ 代表当地社会经济因素,选取农林水事务支出 $X_6$、地块平均面积 $X_7$、耕地自然等别 $X_8$、农用机械总动力 $X_9$ 代表当地生产条件因素。2015 年全国 1% 人口抽样调查数据未能覆盖河南全部地市,故 65 岁以上人口占比采用第六次人口普查数据;耕地平均面积与耕地质量数据来自河南省 2015 年农用地分等定级更新调查成果;其余来自《河南省统计年鉴 2015》。

地理探测器针对类别数据的算法优于连续数据,本文采用自然断裂点法对各影响因子属性进行离散化分类处理,以撂荒程度指数为因变量,经地理探测器探测,结果显示当 $X_3$、$X_5$ 分为 5 类,$X_1$、$X_6$、$X_7$

分为 6 类，$X_2$、$X_4$、$X_9$分为 8 类时，所对应因子的统计显著差异性最佳，$X_8$直接采用统计时的原类别。探测结果不仅测算了以上 9 个单因子的驱动力，还探讨了两因子交互作用关系下的影响力。

## 3　结果与分析

### 3.1　撂荒程度空间分布差异

河南省撂荒耕地统计结果显示，2015 年全省耕地撂荒面积为 174 419.46 $hm^2$，区域整体撂荒率为 2.15%。全省区县中撂荒面积最大为 9 827.68 $hm^2$，最小为 4.21 $hm^2$；撂荒率最大为 38.58%，最小为 0.09%。158 个区县耕地撂荒面积差异较大，55.7% 的区县耕地撂荒面积集中于 100 ~ 1 000 $hm^2$ 之间，撂荒面积极大或极小的区县数量都相对较少，撂荒面积在 2 000 $hm^2$ 以下的区县占 85.4%；撂荒率分布在 1% 以下的区县数占比接近全省的 1/4，与在 1% ~2% 之间的区县数量相当，更多的区县撂荒率位于 2% ~5% 之间，而仅有 14.6% 的区县撂荒率在 5% 以上（图 3）。

从撂荒规模的空间分布看，撂荒面积较小的Ⅰ、Ⅱ级区县大多数分布于豫东黄淮海平原区、豫西熊耳山-崤山山地地带和豫北山前平原区；撂荒面积较大的Ⅲ、Ⅵ级区县则多位于豫东北平原、豫中丘陵岗地与冲积平原相交界区以及豫南伏牛山山地地带、南阳盆地、桐柏山-大别山山地丘陵区（图 4）。撂荒率的空间分布格局与撂荒面积具有一定的相似性，但两者在部分地区并不同步。如驻马店市上蔡县，其撂荒面积属Ⅲ级（1 557 $hm^2$），但撂荒率却属Ⅰ级（1.33%）；再如郑州市二七区，撂荒面积属Ⅰ级（205 $hm^2$），但撂荒率为全省最高（38.58%）。

撂荒程度指数可以较好地综合撂荒面积与撂荒率来表征某地撂荒的程度。如驻马店市上蔡县，其撂荒程度指数属于中度撂荒。而撂荒面积和撂荒率本就同步的一些地区，如撂荒面积大、撂荒率也高的信阳市南部区县，属于重度撂荒；撂荒规模小、撂荒率也低的商丘市、洛阳市等地区县，属于轻度撂荒。

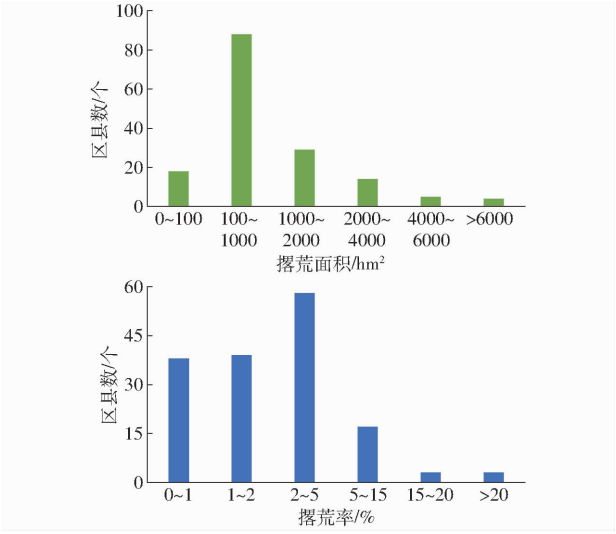


图 3　撂荒面积与撂荒率分布

Fig. 3　Distribution of abandoned area and abandoned rate

撂荒程度指数的空间分布总体呈倒“T”字型格局（图 5），其中，纵向自东北向西南分布于濮阳、新乡、郑州、平顶山等市；横向位于信阳、南阳、驻马店等市。重度撂荒的区县数占比为全省的 17.09%，多位于经济条件比较发达、城市化进程较快的郑州、南阳、信阳等市；中度撂荒的县区占 12.03%，其中超过 1/3 的中度撂荒区县位于南阳市境内；低度撂荒的区县围绕中度和重度撂荒区县散布；轻度撂荒的区县数量最多，占比达 43.04%，连片分布于“T”字两侧为农业占比较高、对耕地依赖较强的商丘、周口、洛阳等市。信阳市成为河南省撂荒程度最高的地区，主要与其区域内严重的人口流出及老龄化现象、较高的城市化水平及复杂的山区地形条件等多种不利因素共同影响有关。

### 3.2　撂荒因子形成机制

借助地理探测器方法对河南省撂荒因素进行因

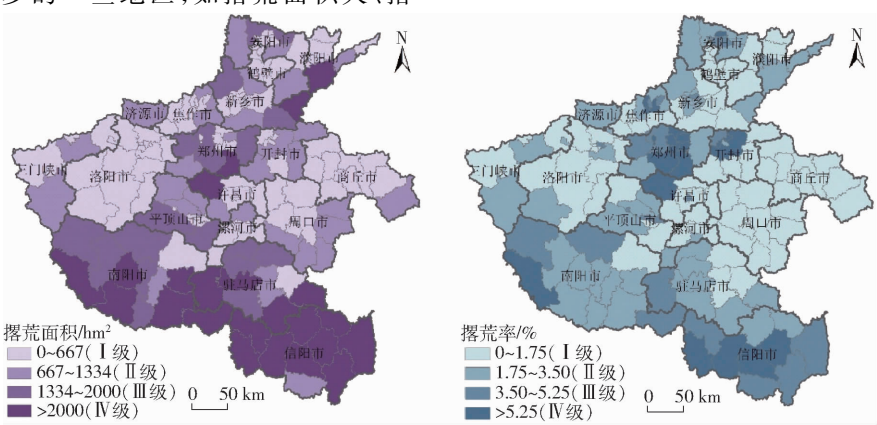


图 4　撂荒面积与撂荒率空间分布图

Fig. 4　Spatial distributions of abandoned area and abandoned rate

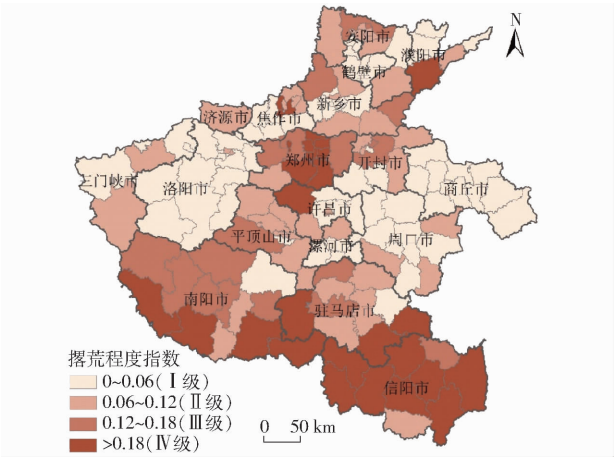


图 5 撂荒程度指数分布图

Fig. 5 Distribution diagram of abandonment degree

子探测和交互探测分析,结果显示,在遴选的 9 个影响因子中,除耕地自然等别 $X_8$ 和农用机械总动力 $X_9$ 外,其余 7 个影响因子均通过显著性检验(表 1)。其中,人口外流数量 $X_2$ 和城镇化率 $X_5$ 对耕地撂荒的解释力相对较强,$q$ 分别为 0.184 和 0.179,65 岁以上人口占比 $X_3$ 的解释力相对较低,$q$ 为 0.103。

在人口因素中,人口外流数量在各因子中解释力度最强($q=0.184$),作为影响农业生产效率的重要条件,稳定的劳动力数量可以保障种植业的耕作面积。当人口外流的增加造成青壮年劳动力数量减少时,农业生产则主要依赖老人及妇女,由于较难承受高难度和高强度的农业劳作,致使原有耕地无法维持耕作,继而造成撂荒现象的发生。从因子类别

**表 1 河南省耕地撂荒因子探测结果**

**Tab. 1 Detected result of abandoned land in Henan Province**

| 参数 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $q$ | 0.114 | 0.184 | 0.103 | 0.154 | 0.179 | 0.148 | 0.172 | 0.024 | 0.049 |
| $p$ | <0.1 | <0.1 | <0.05 | <0.1 | <0.05 | <0.1 | <0.05 | >0.1 | >0.1 |

化空间分布(图 6)可以看出,河南省的人口外流数量(图 6b)由西北向东南递增,与图 5 中撂荒程度指数东南高西北低的特征趋同,尤其对于经济落后的地区,就业环境不佳造成人口迁移严重,撂荒程度随之加剧。

城镇化率和农民人均纯收入作为衡量当地经济发展状况与农民生活水平的重要指标,两者解释力均相对较高,分别为 0.179 和 0.154。伴随二、三产业的快速发展,城镇中大量就业岗位涌现,农业的低收益使得农民开始到非农部门工作,并带来人均纯收入的增加。按照经济学中寻求利益最大化的理性人假说,农民会为此更多地从事务工或经商活动,从而逐步放弃农业生产,造成耕地撂荒发生。在地域空间分布上,河南省城镇化率(图 6e)和农民人均纯收入(图 6d)与撂荒程度具有相似分布特点。

在生产条件因素中,地块平均面积对撂荒的解释力最高($q=0.172$),也仅次于人口外流数量和城镇化率的影响。已有研究表明,当地块细碎程度增加时,将带来化肥、种子等耕作成本的增加[38]。特别是在山区,由于大型农业机械等省工性技术的采用受到限制,农户需投入更多的劳动力代替机械等技术要素,由此使得生产成本显著提高,促使农户无力负担而放弃耕种。图 6g 反映了河南省耕地细碎化的分布情况,总体呈东多南少的特点,大致与撂荒程度呈负相关,即平均地块面积较大的地区撂荒程度相对较轻,耕地越细碎的地区撂荒则相对较重。

### 3.3 因子间交互探测分析

为了探究多因素共同作用对河南省耕地撂荒的影响,本文对选取的 9 个因子进行交互探测分析。结果(表 2)显示,任意两因子交互后的影响力都有不同程度的增强,绝大多数表现为非线性增强,个别表现为双因子增强。其中交互作用驱动力最强的为人口外流数量与人口自然增长率两因子;而单一因子探测中未通过显著性检验的因子,在与其他因子交互后驱动力大幅提升,如农用机械总动力与人口外流数量、农林水事务支出与耕地自然等别两组因子。

人口外流数量与自然增长率交互后产生非线性增强作用,解释力高达 0.699。单一因子的驱动分析已显示人口的大量流失本身会对耕地撂荒产生较大影响,而叠加自然增长率因子后 $q$ 跃升,说明在河南省要实现耕地稳定的生产功能,劳动力充足是基础。当人口自然增长速率较快时,该地区有更多家庭需要负担养育子女的责任,当务农收益低下不能满足增加的生活开销时,家庭中的青壮年会选择外出打工以获取更高收入,从而引发较人口自然增长率低下地区更大的人口外流和劳动力短缺现象,致使耕地撂荒程度进一步加剧。已有研究表明家庭人口越多耕地撂荒情况越严重[23]。

未通过显著性检验的农用机械总动力因子,与人口外流数量因子交互后产生非线性增强作用,解释力达 0.613。说明虽然农业机械化是现代农业的重要物质基础,可以带来农业劳动生产率大幅度提

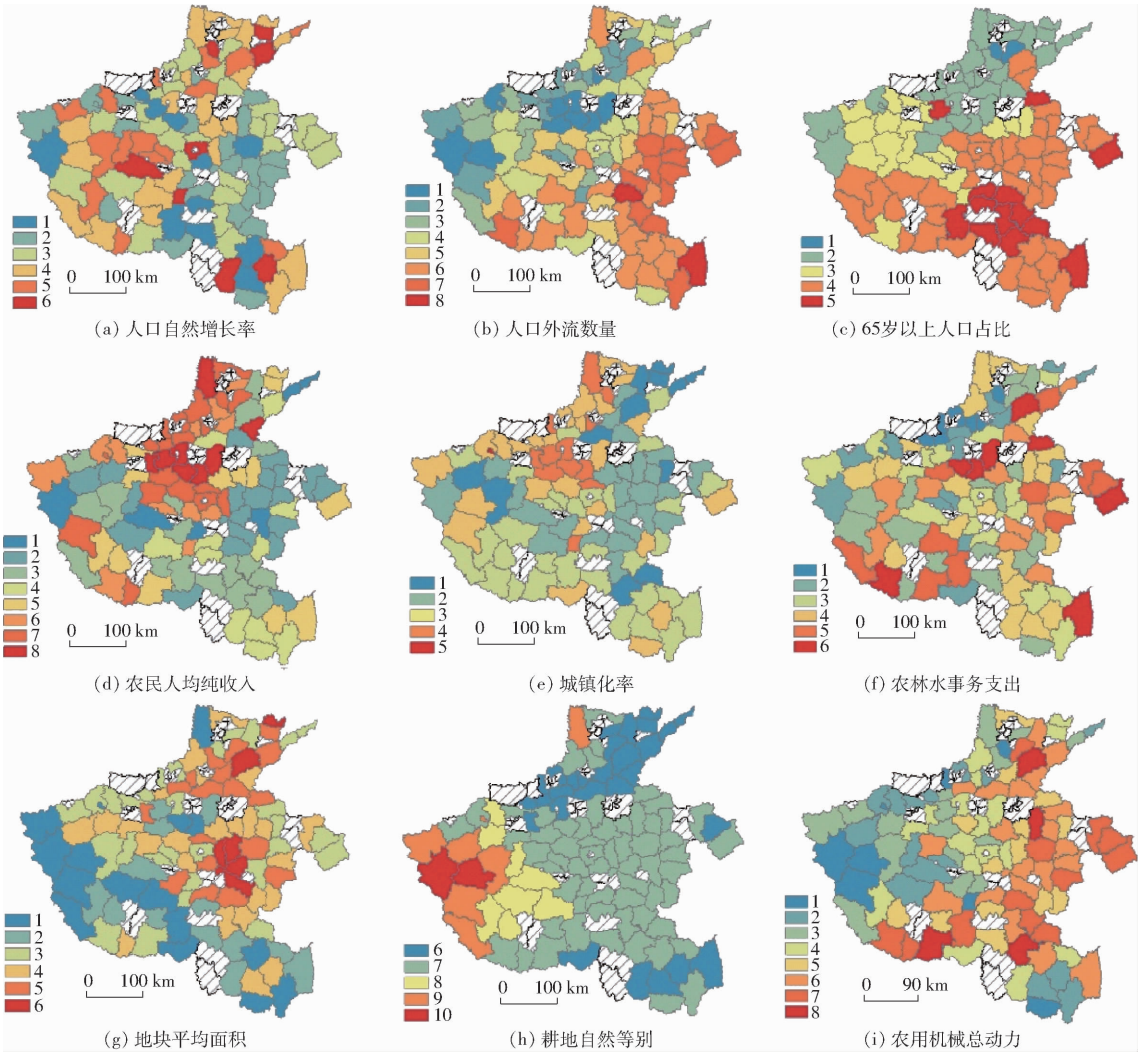


图 6　地理探测因子类别化空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of classified potential determinants

**表 2　河南省耕地撂荒的交互探测结果($q$)**

**Tab. 2　Interaction detected result ($q$) between two factors in Henan abandoned land**

| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0. 114 | | | | | | | | |
| $X_2$ | 0. 699 | 0. 184 | | | | | | | |
| $X_3$ | 0. 378 | 0. 268 | 0. 103 | | | | | | |
| $X_4$ | 0. 433 | 0. 483 | 0. 364 | 0. 154 | | | | | |
| $X_5$ | 0. 499 | 0. 495 | 0. 326 | 0. 394 | 0. 179 | | | | |
| $X_6$ | 0. 541 | 0. 436 | 0. 331 | 0. 583 | 0. 435 | 0. 148 | | | |
| $X_7$ | 0. 461 | 0. 425 | 0. 347 | 0. 410 | 0. 378 | 0. 391 | 0. 172 | | |
| $X_8$ | 0. 266 | 0. 499 | 0. 393 | 0. 407 | 0. 372 | 0. 519 | 0. 454 | 0. 024 | |
| $X_9$ | 0. 405 | 0. 613 | 0. 426 | 0. 542 | 0. 334 | 0. 470 | 0. 533 | 0. 183 | 0. 049 |

高[39]，但单独的机械化水平不足并不会对耕地撂荒造成显著影响。传统农区的农业生产在农业机械化起步以前较少依赖农机设施；而进入城镇化快速发展的新时期后，随着农村青壮年劳动力外流，农业生产活动逐渐产生老龄化及妇女化现象，此时机械作业代替劳动力的作用凸显，其与劳动力结合条件下的撂荒情况会随机械化程度的提高而减轻或先加重再减轻[5,23]。

农林水事务支出与耕地质量交互后产生非线性增强作用，因子解释力提高为 0. 519。说明在当地政府重视下，加强管理和资金投入后，农民将减少对高质量耕地的弃耕撂荒。农业是弱质产业，需要财政对其支持和保护。从农林水事务支出单因子探测结果(0. 148)来看，政府对于农业经营管理支出费

用的增加是保护农业发展的有效手段。当农民获得农业补贴等资金支持后,为获取更大的产量与效益,将权衡资金在各产田间的分配,此时耕地质量将成为农民考虑的重要因素。与低等别耕地相比,农民更愿意将资金投入到高质量耕地的维护中,长久如此则导致低等耕地的弃耕撂荒。

由此可见,单一因子解释力的低下并不意味着该因子在耕地撂荒机制中不起任何驱动作用,而是有可能通过与其他因子的交互作用产生影响。从单一因子来看,人口外流数量、城镇化率和地块平均面积对撂荒的驱动作用最强,而本身作用力不强的个别因子,在与其他因子交互作用后解释力大幅提升。综上所述,河南省耕地撂荒受到多重因素共同作用,其中由于人口外流造成劳动力短缺从而放弃耕地生产,使得人口因素成为该地区耕地撂荒的直接因素;耕地破碎化、耕地质量等生产条件是该地区撂荒的间接因素;而由于城市化水平的不断提高,农业生产收益较低使得经济因素成为该地区撂荒的根本因素。

### 3.4 耕地撂荒地域分异类型

对河南省各市级行政区进行影响因子探测后可得解释力 $q$ 分布情况(图 7),人口外流数量、城镇化率和地块平均面积分别代表当地人口、经济、生产条件,以 $q$ 最大项因子作为制约各市耕地维持耕作的首要因素,可将研究区划分为人口条件约束型、经济条件约束型和生产条件约束型区域 3 种撂荒地域类型。其中人口条件约束型包括安阳市、洛阳市、许昌市、南阳市等,其各县级行政单元之间人口外流数量差异显著,由此产生其辖区内撂荒程度空间分布也存在明显分异现象。三门峡市、开封市、焦作市、商丘市等属于经济条件约束型地区,区域内普遍经济发展较为薄弱,撂荒程度较轻,各区县间人均收入的差异对撂荒影响较为明显。生产条件约束型包括郑州市、平顶山市、信阳市、驻马店市等,因区域内地势起伏较大,导致耕地破碎化现象明显,撂荒程度普遍较重,地块平均面积直接影响着投入成本和农业收益。由于漯河市和鹤壁市仅辖 2 个县级行政区,济源市为省直辖县级市,不符合地理探测器数量要求,故地域类型划分中不包括上述 3 市。

针对 3 种撂荒地域类型(图 7),结合不同地域的环境特征,提出了各自可供借鉴的政策建议。人口条件约束型地区应妥善解决劳动力转移问题,积

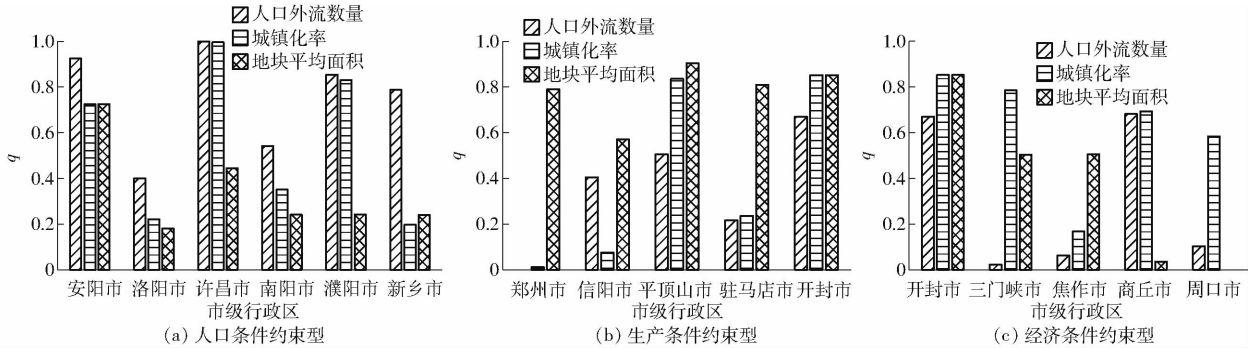


图 7 河南省耕地撂荒主导因素解释力分布

Fig. 7 Power determinant values of dominant factors of abandoned land in Henan Province

极发展就地城镇化,增加本地非农就业机会;进一步推进土地流转和集中,降低交易成本,减少土地流转阻力。针对经济和收入低下对农业活动所产生的不利影响,经济条件约束型地区应完善惠农政策,采取给予农民购买生产资料补贴等形式,加大扶持力度;同时可以建立完善的农民激励机制,提高农民的生产积极性。生产条件约束型地区可以通过加强高标准农田建设,改善农业生产条件、提高土地利用效率;促进农业技术推广,动员科技人员下乡,提高中低产田生产水平。

## 4 讨论

耕地撂荒是当前我国一种重要的土地利用变化现象,同时也是一种比较复杂的社会现象,其产生往往受多种驱动因素的综合影响,以往研究对不同地区所揭示的撂荒原因不尽相同,且各因素作用重要性差别也较大,呈现出显著的空间分异特征。在本文探究的 9 个影响因子中,耕地自然等别与农用机械总动力未经过显著性检验,而通常认为耕地质量和机械化水平对撂荒影响较大。按照森林转型理论中的“经济增长路径”,当农村劳动力脱离农业生产,会根据耕地质量首先选择劣质耕地进行退耕。但就河南省具体情况而言,全省耕地质量相对集中在 6、7 等别,且同等别耕地呈大范围连片分布,区域差异不明显,同时农业的高效生产得益于耕作制度改革、种植结构调整、种子工程、植保工程等项目对粮食单产的提升,从而造成耕地质量对撂荒解释力的下降。

耕地的大规模撂荒不仅会造成耕地资源的严重浪费，更会对我国粮食安全产生威胁。但合理退耕与休耕可以引起生物多样性和生态环境的改变，对生态产生正面效应。2016 年国务院发布《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》，针对我国长期实行集约型农业发展模式，大量施用化肥、农药等化学制品，对农田生态环境造成极大污染的情况，重点在地下水漏斗区、重金属污染区、生态严重退化地区开展休耕试点工作，休耕有利于调节土壤理化性状、改良土壤生态，让耕地休养生息，实现用地养地相结合，保护和提升地力。河南省是我国传统农业大省，也是当前耕地轮作休耕制度试点地区。因此，河南省可结合当前耕地撂荒现状，推进耕地休养生息、促进生态环境改善，加强耕地数量、质量、生态“三位一体”保护。

与以往撂荒问题分析局限于乡镇尺度和问卷调查的研究相比，本文对河南全省的撂荒耕地进行了识别，并较为准确地反映了耕地撂荒的分布特征，弥补了我国目前较大尺度下对耕地撂荒问题研究的不足。在识别撂荒影响因子方面，不依赖农户问卷和地面调查，各项指标均来自统计年鉴或数据库，稳定性较强。分析方法采用地理探测器，不仅可以识别单个因子对撂荒的解释力，更能实现在两因子交互作用下影响强度变化的测度。但本研究还存在一定的不足，突出表现在未能在识别过程中有效区分撂荒地与休耕地，未来有必要在政府部门的协助下，将休耕地从已识别的撂荒地中剔除，更加准确估算撂荒规模与撂荒率，并且可以选取具有代表性的县（市）进行深入研究，以期降低本研究估算结果的不确定性。

## 5　结论

（1）以粮食主产区河南省为例，运用土地变更调查数据和地理国情普查数据识别撂荒耕地，提出撂荒程度指数，刻画了撂荒耕地的总体特征及其空间分布情况，并借助地理探测器揭示了耕地撂荒的影响因子及形成机制，进而根据形成机制的地区分异特征，归纳了不同耕地撂荒的地域类型。2015 年河南省撂荒总面积为 174 419.46 $hm^2$，撂荒率为 2.15%；撂荒现象普遍且地域差异显著，撂荒空间分布呈倒“T”字型格局，其中，纵向自东北向西南分布于濮阳、新乡、郑州、平顶山等市；横向位于信阳、南阳、驻马店等市。

（2）河南省耕地撂荒受多种因素影响，其中，人口因素是该地区撂荒的直接原因，生产因素是间接原因，而经济因素则是根本原因。对于划分的人口条件约束型区域、经济条件约束型区域、生产条件约束型区域 3 种撂荒地域分异类型，因地制宜提出了推进土地流转和集中、就地城镇化，完善惠农政策、增加经济激励，实施高标准农田建设、促进农业技术推广等方式以提高农民的生产积极性，促进耕地合理利用。

## 参　考　文　献


[1] 史铁丑，李秀彬. 欧洲耕地撂荒研究及对我国的启示[J]. 地理与地理信息科学，2013，29(3)：101－103.
SHI Tiechou, LI Xiubin. Farmland abandonment in Europe and its enlightenment to China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 101－103. (in Chinese)

[2] 李燕燕，陈琼，刘峰贵，等. 青藏高原东北部耕地撂荒影响因素分析——以湟水上游为例[J]. 农业现代化研究，2019，40(6)：993－1001.
LI Yanyan, CHEN Qiong, LIU Fenggui, et al. Analysis on the influencing factors of farmland abandoning behaviors in the northeastern Qinghai－Tibet Plateau: a case study of the upper reaches of Huangshui River[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(6): 993－1001. (in Chinese)

[3] BENAYAS J M R, MARTINS A, NICOLAU J M. Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. CAB reviews: perspectives in agriculture[J]. Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 2007, 57(2): 1－12.

[4] 王学斌. 农村土地抛荒现象与中国的粮食安全问题[J]. 世界经济情况，2007(3)：53－60.
WANG Xuebin, Rural land abandonment and China's food security[J]. World Economic Outlook, 2007(3): 53－60. (in Chinese)

[5] 李升发，李秀彬. 耕地撂荒研究进展与展望[J]. 地理学报，2016，71(3)：370－389.
LI Shengfa, LI Xiubin. Progress and prospect on farmland abandonment[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 370－389. (in Chinese)

[6] 张学珍，赵彩杉，董金玮，等. 1992—2017 年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征[J]. 地理学报，2019，74(3)：411－420.
ZHANG Xuezhen, ZHAO Caishan, DONG Jinwei, et al. Spatio-temporal pattern of cropland abandonment in China from 1992 to 2017: a meta-analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 411－420. (in Chinese)

[7] MEYFROIDT P, LAMBIN E F. Global forest transition prospects for an end to deforestation[J]. The Annual Review of Environment and Resources, 2011, 36: 343－371.

[8] QUEIROZ C, BEILIN R, FOLKE C, et al. Farmland abandonment: threat or opportunity for biodiversity conservation? A global review[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2014, 12(5): 288－296.

[9] LIESKOVSKY J, BEZAK P, SPULEROZV J, et al. The abandonment of traditional agricultural landscape in Slovakia: analysis of extent and driving forces[J]. Journal of Rural Studies, 2015, 37(3): 75－84.

[10] KOZAK J. Forest cover change in the western Carpathians in the past 180 years: a case study in the Orawa Region in Poland

[J]. Mountain Research and Development, 2003, 23(4): 369 - 375.
[11] PRISHCHEPOV A V, MUELLER D, DUBININ M, et al. Determinants of agricultural land abandonment in post-Soviet European Russia[J]. Land Use Policy, 2013, 30(1): 873 - 84.
[12] ALIX-GARCIA J, KUEMMERLE T, RADELOFF V C. Prices, land tenure institutions, and geography: a matching analysis of farmland abandonment in post-socialist eastern Europe[J]. Land Economics, 2012, 88(3): 425 - 443.
[13] LEVERS C, SCHNEIDER M, PRISHCHEPOV A V, et al. Spatial variation in determinants of agricultural land abandonment in Europe[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 95 - 111.
[14] OSAWA T, KOHYAMA K, MITSUHASHI H. Multiple factors drive regional agricultural abandonment[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 478 - 483.
[15] SHIVELY G, MARTINEZ E, ANGELSEN A, et al. Deforestation, irrigation, employment and cautious optimism in southern Palawan, the Philippines[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(11): 3295 - 3311.
[16] TACHIBANA D, NGUYEN T M, OTSUKA K. Agricultural intensification versus extensification: a case study of deforestation in the Northern-Hill Region of Vietnam[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2001, 41(1): 44 - 69.
[17] 关小克,王秀丽,陈伟强. 县域耕地边际化风险评价与验证[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):153 - 160.
GUAN Xiaoke, WANG Xiuli, CHEN Weiqiang. Risk evaluation and verification of marginalization of farmland in county area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 153 - 160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2002017&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.017. (in Chinese)
[18] KHANAL N R, WATANABE T. Abandonment of agricultural land and its consequences: a case study in the Sikles Area, Gandaki Basin, Nepal Himalaya[J]. Mountain Research and Development, 2006, 26(1): 32 - 40.
[19] MACDONALD D, CRABTREE J R, WIESINGER G, et al. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: environmental consequences and policy response[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 59(1): 47 - 69.
[20] 杨国永,许文兴. 耕地撂荒及其治理——文献述评与研究展望[J]. 中国农业大学学报,2015,20(5):279 - 288.
YANG Guoyong, XU Wenxing. Cultivated land abandoning and its governance: literature review and research prospective[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(5): 279 - 288. (in Chinese)
[21] 张英,李秀彬,宋伟,等. 重庆市武隆县农地流转下农业劳动力对耕地撂荒的不同尺度影响[J]. 地理科学进展,2014,33(4):552 - 560.
ZHANG Ying, LI Xiubin, SONG Wei, et al. Effect of agricultural laborer on cropland abandonment under land circulation at different levels in Wulong County, Chongqing City[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 552 - 560. (in Chinese)
[22] 史铁丑,李秀彬. 基于地块尺度的重庆山区耕地撂荒风险研究[J]. 山地学报,2017,35(4):543 - 555.
SHI Tiechou, LI Xiubin. Cropland abandonment risk at parcel level in Chongqing mountainous area[J]. Mountain Research, 2017, 35(4): 543 - 555. (in Chinese)
[23] 朱小文,马能文,胡鹏飞,等. 近 20 年陇东黄土高原耕地撂荒及其驱动力研究——以甘肃省平凉市崆峒区为例[J]. 中国农学通报,2019,35(9):95 - 101.
ZHU Xiaowen, MA Nengwen, HU Pengfei, et al. Farmland abandonment on the Loess Plateau of Longdong Region during the past 20 years and its driving force: a case study of Kongtong District, Pingliang City, Gansu Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(9): 95 - 101. (in Chinese)
[24] 宋世雄,梁小英,陈海,等. 基于多智能体和土地转换模型的耕地撂荒模拟研究——以陕西省米脂县为例[J]. 自然资源学报,2018,33(3):515 - 525.
SONG Shixiong, LIANG Xiaoying, CHEN Hai, et al. The simulation of cropland abandonment based on multi-agent system and land transformation model: a case study of Mizhi County, Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 515 - 525. (in Chinese)
[25] 李文辉,戴中亮. 一个基于农户家庭特征的耕地撂荒假说[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(10):143 - 149.
LI Wenhui, DAI Zhongliang. A hypothesis of farmland abandoning based on the farmers' family characters[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(10): 143 - 149. (in Chinese)
[26] 田玉军,李秀彬,马国霞,等. 劳动力析出对生态脆弱区耕地撂荒的影响[J]. 中国土地科学,2010,24(7):4 - 9.
TIAN Yujun, LI Xiubin, MA Guoxia, et al. Influences of labor emigration from agriculture on the production abandonment of cultivated land in ecological sensitive areas[J]. China Land Science, 2010, 24(7): 4 - 9. (in Chinese)
[27] 程维芳,周艺,王世新,等. 基于多光谱遥感的撂荒地识别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(6):1615 - 1620.
CHENG Weifang, ZHOU Yi, WANG Shixin, et al. Study on the method of recognizing abandoned farmlands based on multispectral remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1615 - 1620. (in Chinese)
[28] 邓欣雨. 基于遥感时序分析的黑龙江省撂荒地时空监测[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
DENG Xinyu. Spatial-temporal analysis of farmland abandonment in Heilongjiang Province using time series remote sensing data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese)
[29] XIE H, WANG P, YAO G. Exploring the dynamic mechanisms of farmland abandonment based on a spatially explicit economic model for environmental sustainability: a case study in Jiangxi Province, China[J]. Sustainability, 2014, 6(3): 1260 - 1282.
[30] 李升发,李秀彬,辛良杰,等. 中国山区耕地撂荒程度及空间分布——基于全国山区抽样调查结果[J]. 资源科学,2017,39(10):1801 - 1811.
LI Shengfa, LI Xiubin, XIN Liangjie, et al. Extent and distribution of cropland abandonment in Chinese mountainous areas [J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1801 - 1811. (in Chinese)
[31] 金芳芳,辛良杰. 中国闲置耕地的区域分布及影响因素研究[J]. 资源科学,2018,40(4):719 - 728.
JIN Fangfang, XIN Liangjie. Spatial distribution and impact factors of farmland abandonment[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 719 - 728. (in Chinese)
[32] 赵晓丽,张增祥,汪潇,等. 中国近 30a 耕地变化时空特征及其主要原因分析[J]. 农业工程学报,2014,30(3):1 - 11.
ZHAO Xiaoli, ZHANG Zengxiang, WANG Xiao, et al. Analysis of Chinese cultivated land's spatial-temporal changes and

causes in recent 30 years[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(3):1 - 11. (in Chinese)
[33] 郭谁琼,黄贤金,白晓飞,等.土地利用变更调查数据的应用研究现状与前景[J].中国土地科学,2013,27(12):18 - 24,97.
GUO Shuiqiong, HUANG Xianjin, BAI Xiaofei, et al. The application of the land use change data: status quo and prospects [J]. China Land Science, 2013,27(12):18 - 24,97. (in Chinese)
[34] 李国华,关梅,江娜,等.基于地理国情普查与土地利用现状数据融合分析研究——以黄河三角洲地区数据为例[J].山东国土资源,2019,35(8):64 - 69.
LI Guohua, GUAN Mei, JIANG Na, et al. Data fusion analysis based on geographical conditions survey and present of land use[J]. Shandong Land and Resources, 2019,35(8):64 - 69. (in Chinese)
[35] 国务院新闻办公室网站.地理国情普查和土地调查数据配合使用 实现国土资源优化配置[EB/OL].[2017 - 04 - 24]. http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwbfbh/wqfbh/35861/36528/zy36532/Document/1549337/1549337.htm.
[36] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116 - 134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116 - 134. (in Chinese)
[37] 杨通,郭旭东,岳德鹏,等.基于联合变化检测的耕地撂荒信息提取与驱动因素分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):201 - 208.
YANG Tong, GUO Xudong, YUE Depeng, et al. Information extraction and driving factor assessment of farmland abandonment based on joint change detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):201 - 208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190622&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.022. (in Chinese)
[38] 王亚辉,李秀彬,辛良杰.耕地地块细碎程度及其对山区农业生产成本的影响[J].自然资源学报,2019,34(12):2658 - 2672.
WANG Yahui, LI Xiubin, XIN Liangjie. Characteristics of cropland fragmentation and its impact on agricultural production costs in mountainous areas[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(12):2658 - 2672. (in Chinese)
[39] 白人朴.农业机械化与农民增收[J].农业机械学报,2004,35(4):179 - 182.
BAI Renpu. Agricultural mechanization and increase in farmers' income [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(4):179 - 182. (in Chinese)

(上接第 126 页)

[15] MIRANDA-FUENTES A, MARUCCO P, GONZALEZ-SANCHEZ E J, et al. Developing strategies to reduce spray drift in pneumatic spraying in vineyards: assessment of the parameters affecting droplet size in pneumatic spraying[J]. Science of the Total Environment, 2018,616:805 - 815.
[16] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(10):64 - 71.
ZHOU Liangfu, FU Ximin, DING Weimin, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(10):64 - 71. (in Chinese)
[17] DE COCK N, MASSINON M, SALAH S O T, et al. Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models[J]. Biosystems Engineering, 2017,162:99 - 111.
[18] MUSIU E M, QI Lijun, WU Yalei. Evaluation of droplets size distribution and velocity pattern using computational fluid dynamics modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,164:104886.
[19] 陈荣康. 辅助气流作用下高郁闭度作物冠层孔隙率变化研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2017.
CHEN Rongkang. Study on canopy porosity change of high canopy density under auxiliary airflow[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2017. (in Chinese)
[20] 武民庆. 辅助气流作用下棉花冠层茎叶变形及雾滴沉积性能试验研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
WU Minqing. Study on the deformation of cotton canopy stems and leaves and the droplet deposition law under assisted airflow [D]. Taian:Shandong Agricultural University,2019. (in Chinese)
[21] 封伟建,邵传平. 银杏树叶的气动特性研究[J]. 中国计量大学学报, 2017, 28(4): 448 - 453.
FENG Weijian, SHAO Chuanping. Study on the aerodynamic characteristics of ginkgo leaves[J]. Journal of China University of Metrology, 2017, 28(4): 448 - 453. (in Chinese)
[22] DEKEYSER D, FOQUÉ D, DUGA A T, et al. Spray deposition assessment using different application techniques in artificial orchard trees[J]. Crop Protection, 2014,64:187 - 197.
[23] 倪万潮, 张香桂, 邹芳刚. 现代中国棉花生产技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
[24] LIU Xinghua, LIU Xuemei, LI Yang, et al. Estimation model of canopy stratification porosity based on morphological characteristics: a case study of cotton[J]. Biosystems Engineering, 2020,193:174 - 186.
[25] QIN Weicai, XUE Xinyu, CUI Longfei, et al. Optimization and test for spraying parameters of cotton defoliant sprayer[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(4):63 - 72.
[26] WU Shu, WEI Xinhua. Mechanical interaction between a canopy opener and rice stalks based on the transient dynamic analysis [J]. Biosystems Engineering, 2019,178:256 - 263.
[27] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 挡板导流式罩盖喷雾机结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报, 2011,42(10):101 - 104.
ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Structure optimization and performance research of guided baffle shield sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):101 - 104. (in Chinese)
[28] 刘雪美,苑进,宋来其,等. 一种自适应冠层打开气流辅助喷雾装置及方法:202010944105.8[P]. 2020 - 09 - 10.