

# 基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析

李鹏山<sup>1</sup> 吕雅慧<sup>1</sup> 张超<sup>1,2</sup> 郎文聚<sup>2</sup> 杨建宇<sup>1,2</sup> 朱德海<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 为了深入分析京津冀地区耕地破碎化和人工干扰程度,以空间网格为基本单元,采用核密度函数法对耕地进行密度计算,继而采用自然断点法进行密度分区,采用景观格局指数法,对耕地的空间分布特征、破碎化程度进行定量分析,最后采用耕地破碎度指数和人工干扰指数对比分析提出耕地整治的方向。结果表明:耕地核密度变化范围为0~95.08点/km<sup>2</sup>,85%以上的耕地集中分布在区域中部和东南部的中密度区到高密度区,耕地面积随着密度降低而减少;耕地斑块密度指数、斑块边界密度指数、面积加权分维数和耕地斑块聚集度在不同密度区的变化情况均反映出破碎化程度随着耕地密度减小而增大;耕地破碎度指数和人工干扰度指数均随着耕地密度降低而升高,人工干扰是该区域耕地破碎化程度加剧的主要因素。采用核密度估计法能合理地反映耕地聚集程度和破碎化程度,可为京津冀地区协同发展、耕地整治和土地利用优化布局提供理论支撑。

**关键词:** 京津冀地区; 耕地; 空间格局; 核密度估计; 破碎化

**中图分类号:** F301; S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0281-07

## Analysis of Cultivated Land Fragmentation in Beijing – Tianjin – Hebei Region Based on Kernel Density Estimation

Li Pengshan<sup>1</sup> Lü Yahui<sup>1</sup> Zhang Chao<sup>1,2</sup> Yun Wenju<sup>2</sup> Yang Jianyu<sup>1,2</sup> Zhu Dehai<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Beijing – Tianjin – Hebei Region is one of the most important developing regions in China, which relates to the national development strategy. The paper's purpose is to analyze the fragmentation degree and artificial interference of the cultivated land. The space grid was taken as the basic unit and the density of cultivated land was calculated by kernel density function. And the density zoning was realized by natural breaks method. Then, the spatial distribution characteristics and the fragmentation degree of the cultivated land quantitatively were analyzed by using landscape pattern indexes. Finally, the direction of the consolidation of cultivated land was indicated by making a comparative analysis of the cultivated land fragmentation index and the artificial disturbance index. The results show that, the variation range of the density of cultivated land is 0 ~ 95.08 points/km<sup>2</sup>, and more than 85% of the cultivated lands are distributed in the medium to high density region, centrally located in the central and southeastern of the region. The cultivated land area was decreased with the reduction of density value. The patch density, patch edge density, area weighted fractal dimension and the variation of the degree of aggregation in different density zones of the cultivated land all showed that, the fragmentation of the cultivated land was increased with the reduction of density value, but it was decreased with the reduction of density value in different density zones of artificial landscape. Both the degree of fragmentation and the degree of artificial disturbance were increased gradually with the increasing density value of cultivated

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2016-01-07

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511010-06)

作者简介: 李鹏山(1985—),男,讲师,博士生,主要从事农业信息化技术及3S在土地和农业中的应用研究,E-mail: targetlps@gmail.com

通信作者: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感在土地和农业中的应用研究,E-mail: zhangchaobj@cau.edu.cn

land. And the human disturbance is the main factor to the increasing fragmentation in the region. Using kernel density function method can reflect the aggregation degree and the change characteristics of fragmentation of cultivated land more reasonably, and it can provide a reference for land consolidation and land use optimization in Beijing – Tianjin – Hebei Region.

**Key words:** Beijing – Tianjin – Hebei Region; cultivated land; spatial pattern; kernel density estimation; fragmentation

## 引言

耕地是人类进行农业生产活动的最重要资源保障,耕地斑块破碎化导致了耕地生产能力下降,限制了耕地机械化规模化生产,是制约我国农业现代化发展的重要因素<sup>[1]</sup>。当前,我国正处在经济快速发展时期,频繁的社会生产活动对耕地空间格局的影响大大超出了自然因素的干扰<sup>[2]</sup>,成为耕地破碎化的主导因素<sup>[3-4]</sup>。城镇建设用地加速扩张和道路网络的快速发展,在大量耕地转变为建设用地的同时,耕地破碎化程度不断加剧<sup>[5]</sup>。尤其是在过去十余年,京津冀地区不合理的城乡规划和土地利用方式,以及社会经济超预期的发展,导致区域耕地破碎化严重<sup>[6]</sup>。当前,耕地破碎化是京津冀地区土地整治和现代农业发展面临的突出问题之一。资源整合和跨区域治理是京津冀协同发展的先决条件,耕地作为该地区最重要的资源之一,耕地破碎化的分析可为区域土地利用优化布局提供科学支撑,对实现一体化发展战略至关重要。

近年来,国内外学者从耕地破碎化形成的原因<sup>[7]</sup>、时空演变特征与驱动机制<sup>[8-9]</sup>、生产效率<sup>[10]</sup>、耕地整理<sup>[11-12]</sup>及效应<sup>[13-14]</sup>等方面展开了一系列的研究。关于耕地破碎化的方法研究主要以逻辑推理法、统计分析法和计量经济模型法等经济学方法为主<sup>[7]</sup>;近几年,地理空间分析方法和景观生态学方法逐渐应用于耕地破碎化研究<sup>[15-16]</sup>,尤其是景观指数能高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置特征<sup>[17]</sup>,被逐渐引入耕地破碎化研究<sup>[18-19]</sup>。

核密度估计方法(Kernel density estimation, KDE)是从样本数据本身出发,研究数据整体分布特征的一种方法<sup>[20]</sup>。该方法在自然灾害、公共健康、产业空间布局热点分析与探测等领域得到了广泛的应用<sup>[21]</sup>,蔡雪娇等<sup>[22]</sup>采用核密度估算方法对路网络与景观破碎化分析进行了探索,取得较为理想的效果。本文以空间网格为基础,采用KDE对京津冀地区的耕地进行核密度计算,继而进行密度分区,结合景观格局指数对不同密度区的耕地特征和破碎化程度定量分析,最后采用人工干扰度分析引起破碎化的原因,并提出耕地整治方向及建议,以期为该

区域土地整治和土地利用协调优化布局提供参考。

## 1 研究区及数据概况

### 1.1 研究区概况

京津冀地区包括北京市、天津市和河北省,位于中国华北平原北隅,地处燕山、太行山和内蒙古高原东南侧,北与内蒙古、辽宁接壤,西与山西毗邻,南部、东南部分别与河南、山东交界,东北紧傍渤海,地理坐标 $36^{\circ}05'N \sim 42^{\circ}37'N, 113^{\circ}11'E \sim 119^{\circ}45'E$ ,见图1。

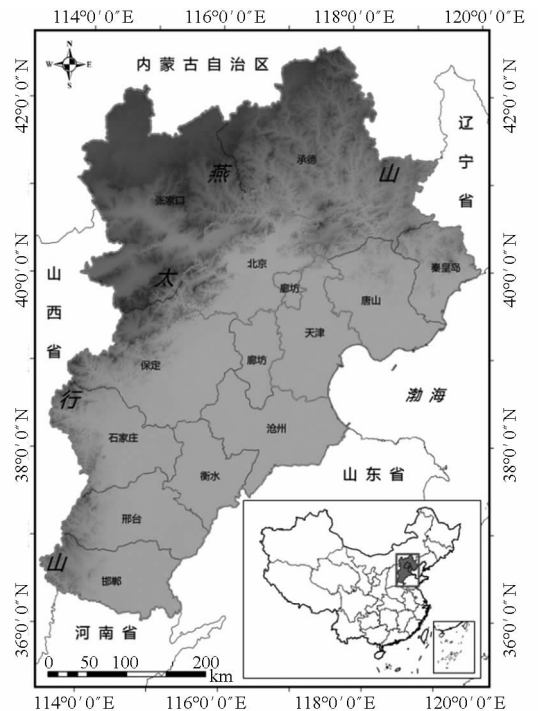


图1 京津冀地区地理位置图

Fig. 1 Geographical position of Beijing – Tianjin – Hebei Region

该区域总面积 $2.169 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,从西北向东南大致呈半环状逐渐下降,高原、山地、平原3种地貌类型分异明显,西北部高原、山地和丘陵面积占全区面积的53.83%,中部和东南部的平原区面积占全区面积的46.17%。区域内水系由海河水系、滦河水系、辽河水系等外流水系和坝上内陆水系构成,水资源总量为161.3亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 。根据全国第2次土地调查主要数据成果公报,京津冀地区耕地面积为72356.89 $\text{km}^2$ ,其中北京市2271.70 $\text{km}^2$ ,天津市

4 471.66 km<sup>2</sup>, 河北省 65 613.53 km<sup>2</sup>。该地区的耕地面积约占土地总面积的三分之一, 主要分布在中部和东南部的平原区, 以及西北部高原区、山间盆地和谷底; 研究区北部的燕山山区、西部的太行山山区以及东部的渤海湾沿岸耕地少量散布。

### 1.2 主要数据源及处理

所采用的基础数据包括国家基础地理信息中心发布的京津冀地区 30 m 分辨率的 2010 年土地覆被数据, 2011 年 1:50 万省级土地利用现状数据以及 2013 年 1:50 万省级土地利用更新数据。首先, 将 2010 年的土地覆被数据进行拼接和裁剪; 其次, 以 2011 年的土地利用现状图为基础数据融合 2010 年的土地覆被数据; 最后, 采用 2013 年的土地利用更新数据对研究区的耕地和人造地表进行更新, 最终获得本文所需的基础数据。

## 2 研究方法

首先采用核密度函数对耕地密度进行计算; 继而采用自然断点法进行耕地密度分区; 最后采用景观格局指数法对耕地的空间分布特征、破碎化程度进行分析; 最后对引起耕地破碎化的主要因素进行定量分析, 并提出土地整治方向。技术路线见图 2。

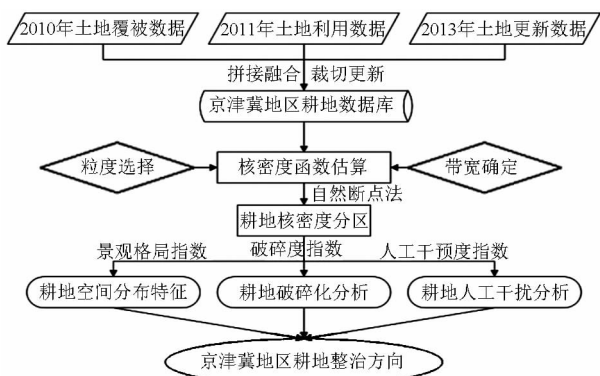


图 2 耕地破碎化分析技术路线图

Fig.2 Technology route of cultivated land fragmentation analysis

### 2.1 核密度估算法

KDE 方法以每个样点  $i(x, y)$  为中心, 通过核函数计算出每个样点在指定半径范围内 (以带宽  $h$  为半径的圆) 各个栅格单元中心点的密度贡献值, 搜索半径范围的栅格单元中心点距离样点越近, 其密度贡献值越大。本文采用二维核密度函数<sup>[23]</sup>对研究区的耕地栅格数据进行计算, 计算公式为

$$\hat{f}(x, y) = \frac{3}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left[ 1 - \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{h^2} \right]^2 \quad (1)$$

式中  $\hat{f}(x, y)$ ——待估算栅格单元中心点  $(x, y)$  的密度

$h$ ——带宽  $x_i, y_i$ ——样点  $i$  的坐标

$n$ ——带宽范围内样点的个数

$x, y$ ——带宽范围内待估算栅格中心点坐标

$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2$  表示带宽范围内待估算栅格中心点和样点  $i$  之间欧氏距离的平方。其中, 栅格数据的粒度和核函数搜索半径或带宽是影响计算结果的 2 个重要参数。

#### 2.1.1 粒度选择

在 KDE 运算时, 将矢量数据转换为栅格数据, 栅格数据的粒度对 KDE 计算结果和运算速度有所影响。本文以矢量数据与栅格数据面积差为选择依据, 对 30 m × 30 m、50 m × 50 m、100 m × 100 m、200 m × 200 m、500 m × 500 m 和 1 000 m × 1 000 m 等粒度进行了对比分析, 发现粒度为 100 m × 100 m 时, 面积差值最小。因此, 本文确定使用 100 m × 100 m 粒度的栅格数据进行核密度估算。

#### 2.1.2 带宽确定

在进行核密度估算时, 随着带宽  $h$  减小, 估计点密度变化突兀不平;  $h$  增大时, 空间上点密度的变化更光滑, 但会掩盖密度的结构<sup>[22]</sup>。以往研究一般通过多次试验来确定带宽  $h$ , 即搜索半径  $S_R$  计算公式为

$$S_R = 0.9n^{-0.2} \min \left( S_D, D_m \sqrt{\frac{1}{\ln 2}} \right) \quad (2)$$

式中  $S_D$ ——标准距离

$D_m$ ——中值距离

为了判断搜索半径对 KDE 计算结果的影响, 本文以  $S_R = 2^x$  为搜索半径 ( $x \geq 0$ , 单位: km), 当  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  时, 与式 (2) 进行对比试验, 最后确定采用式 (2) 计算的带宽对京津冀地区的耕地进行核密度估算。

### 2.2 耕地破碎化评价指标选取

本研究结合京津冀地区耕地空间分布特征, 从田块数量、边界分割程度、形状复杂程度和聚集程度等方面, 选取耕地斑块密度指数、斑块边界密度指数、面积加权分维数和耕地斑块聚集度 4 个景观格局指数来分析不同密度区耕地破碎化程度, 采用耕地破碎度指数分析总体的破碎化程度。

#### 2.2.1 耕地斑块密度指数

耕地斑块密度指数 ( $P_D$ ) 是指评价单元内某土地类型在单位土地面积上拥有的田块数量,  $P_D$  越大, 表明破碎化程度越高, 计算公式为

$$P_D = N/A \quad (3)$$

式中  $N$ ——耕地田块数

$A$ ——耕地面积

### 2.2.2 斑块边界密度指数

斑块边界密度指数 ( $E_D$ ) 是评价单元内耕地斑块边界长度与耕地面积之比,  $E_D$  越大, 表明单位面积上耕地类型拥有的边界长度大, 分割程度高, 破碎化程度也高<sup>[24]</sup>, 计算公式为

$$E_D = E/A \quad (4)$$

式中  $E$ ——评价范围内耕地斑块的边界总长度

### 2.2.3 面积加权分维数

面积加权分维数 ( $A_w$ ) 通过一定的空间尺度范围来反映斑块形状的复杂性, 用来测定斑块形状影响内部斑块的生态过程<sup>[17]</sup>, 取值范围  $[1, 2]$ ,  $A_w$  越靠近 1, 斑块形状越简单; 相反,  $A_w$  越靠近 2, 斑块形状越复杂, 计算公式为

$$A_w = \sum_i^m \frac{2 \ln(0.25 P_i)}{\ln a_i} \frac{a_i}{A} \quad (5)$$

式中  $P_i$ ——田块周长  $a_i$ ——田块面积  
 $m$ ——评价范围内耕地斑块总数

### 2.2.4 耕地斑块聚集度

耕地斑块聚集度指数 ( $A_I$ ) 取值范围  $[0, 100]$ ,  $A_I$  越大, 则代表评价单元由少数团聚的大斑块组成;  $A_I$  越小, 则代表评价单元由许多小斑块组成, 计算公式为

$$A_I = 100 \left( 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{P_{ij} \ln P_{ij}}{2 \ln m} \right) \quad (6)$$

式中  $P_{ij}$ ——随机选择的 2 个相邻栅格单元属于耕地  $i$  与  $j$  的概率

### 2.2.5 耕地破碎度指数

耕地破碎度指数 ( $F_N$ ) 是指研究区范围内耕地

被分割的破碎程度,  $F_N$  取值范围  $[0, 1]$ , 其值越大, 耕地破碎化程度越高, 1 代表已完全破碎, 0 则表示无破碎化存在, 该指数从总体上反映耕地的破碎化程度, 计算公式为

$$F_N = N_F - 1/M_{PS} \quad (7)$$

式中  $N_F$ ——耕地斑块总数

$M_{PS}$ ——平均斑块面积

### 2.3 人工干扰指数

人工干扰指数 ( $H_D$ ) 是量度人类对耕地干扰程度的指标,  $H_D$  越大, 人类活动对耕地造成的干扰程度越高。人工干扰指数用于耕地破碎化成因分析, 计算公式为

$$H_D = A_h/A \quad (8)$$

式中  $A_h$ ——人工地表面积

## 3 结果与分析

### 3.1 耕地核密度估算结果

为了更加直观地反映研究区耕地的空间分布状况, 采用  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的网格计算耕地比重。根据 KDE 法, 对耕地进行核函数计算, 得到耕地核密度变化范围为每平方公里  $0 \sim 95.08$  个栅格。采用自然断点法将耕地密度区划分为 5 个评价单元, 分别为: 低密度区 ( $0 \sim 8.20$  点/ $\text{km}^2$ ), 中低密度区 ( $8.21 \sim 26.85$  点/ $\text{km}^2$ ), 中密度区 ( $26.86 \sim 50.71$  点/ $\text{km}^2$ ), 中高密度区 ( $50.72 \sim 73.08$  点/ $\text{km}^2$ ) 和高密度区 ( $73.09 \sim 95.08$  点/ $\text{km}^2$ )。结果如图 3 所示。

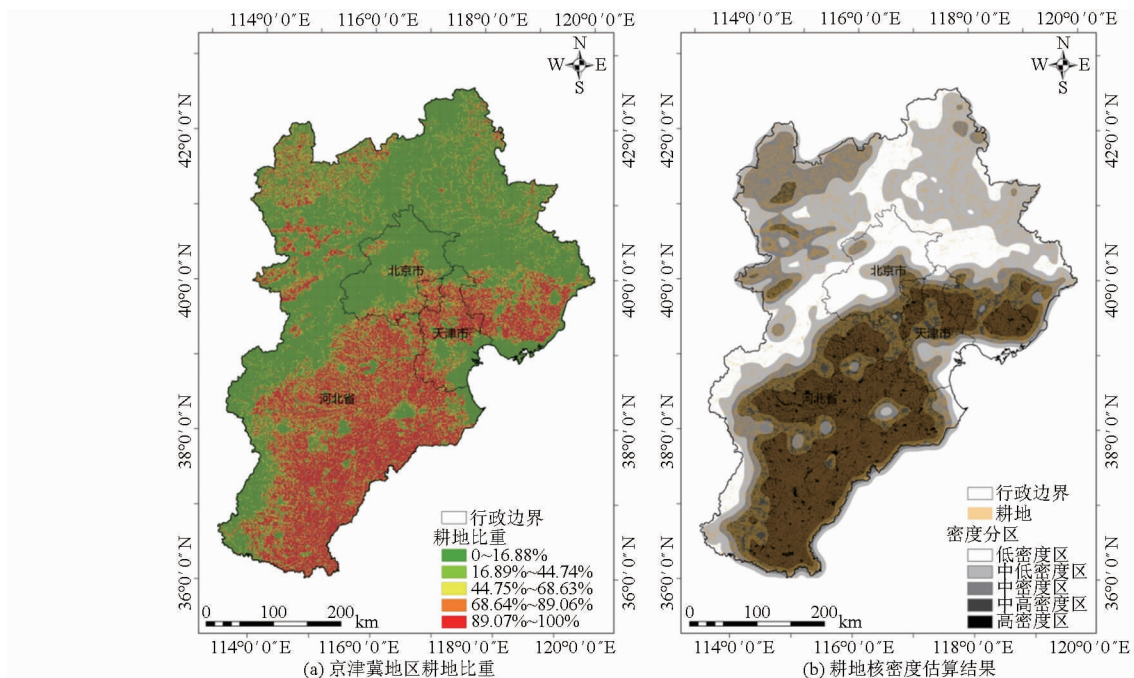


图3 耕地比重与核密度估算结果

Fig. 3 Proportion of cultivated land and results on kernel density estimation

图 3 显示,耕地密度与比重分布特征一致。比重较高的耕地集中分布在中密度区到高密度区,比重较低的耕地散布在中密度区到低密度区;约 42% 的空间网格耕地比重大于 44.75%,85% 以上的耕地分布在中密度区到高密度区。

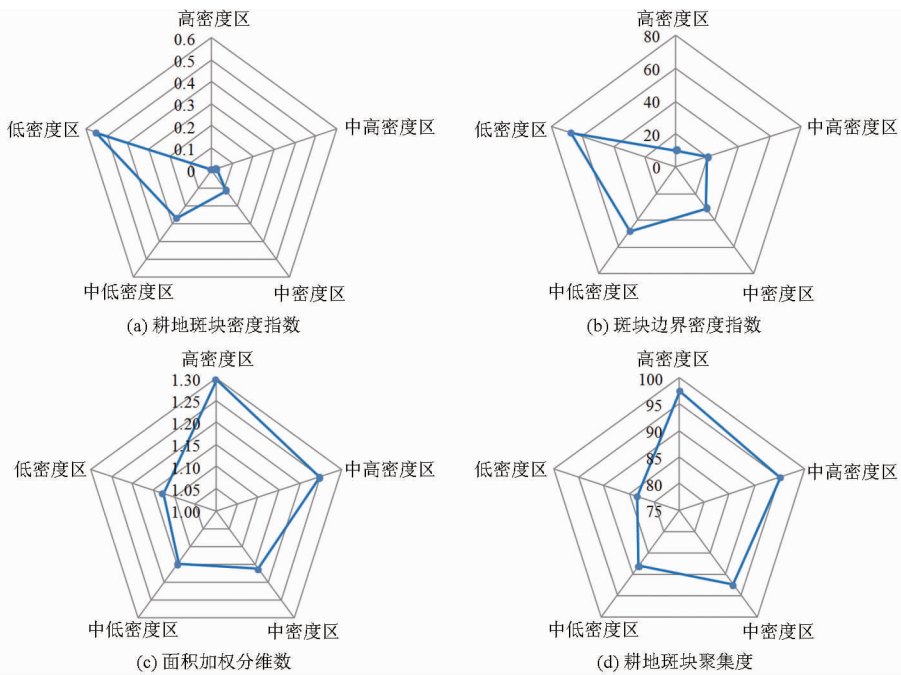


图 4 耕地破碎化指数雷达图

Fig. 4 Radar charts of cultivated land fragmentation index

耕地斑块密度指数利用田块数量与面积比来描述耕地的破碎化差异,斑块边界密度指数揭示了斑块边界的分割程度,是破碎化程度的直接反映<sup>[24]</sup>。图 4a 和图 4b 显示,  $P_d$  和  $E_d$  均随着耕地密度由高到低逐渐增大,其变化特征表明破碎化程度从耕地高密度区到低密度区在逐渐增加。

面积加权分维数从斑块复杂性程度来反映耕地的破碎化程度,耕地斑块聚集度从斑块之间的聚集程度与相对面积来反映耕地破碎化程度。图 4c 和图 4d 显示,  $A_w$  和  $A_l$  均随着耕地密度由高到低逐渐减小,其变化特征表明破碎化程度从耕地高密度区到低密度区在逐渐增加。

对比图 3 和图 4,京津冀地区的耕地在各密度区呈现不同的特点。在高密度区,耕地集中连片,田块面积大,边界分割度低,聚集度高,破碎化程度低;但是,耕地高密度区人造地表比例高,城镇扩张不断侵占优质耕地,道路对耕地的分隔明显。在中高密度区,平原地区的耕地特点与高密度区相似,破碎化程度较低;在高原地区,虽然耕地分片集中,人为干扰也有所减弱,破碎化程度相对较低,但是生态环境脆弱,耕地质量有待提升。在中密度区,虽然平原地区和高原、谷地的耕地相对聚集,破碎化程度居中,城市外围区的耕地区位条件较好;但是生态条件有

### 3.2 不同密度区耕地破碎度变化特征分析

采用耕地斑块密度指数、斑块边界密度指数、面积加权分维数和耕地斑块聚集度对京津冀地区不同密度区的耕地破碎化程度进行计算,分析耕地破碎度指数在不同密度区的变化,结果见图 4。

待改善,耕地质量有待提升。在中低密度区,耕地分布范围广,较为零散,田块边界褶皱,形状复杂程度有所降低,聚集程度明显减弱;但是城市近郊耕地受人工干扰程度较高。在低密度区,耕地面积小,零星分布,边界分割度高,形状复杂程度低,聚集度低,破碎化程度高。

### 3.3 耕地破碎化人工干扰分析

通过以上分析,可以判断人工景观对耕地破碎化有明显的影 响,为了从整体上分析京津冀地区耕地的破碎化程度和人工干扰程度,采用耕地破碎度指数和人工干扰指数进行对比分析,结果见图 5。

图 5 显示,  $F_N$  的变化反映出耕地破碎化程度随

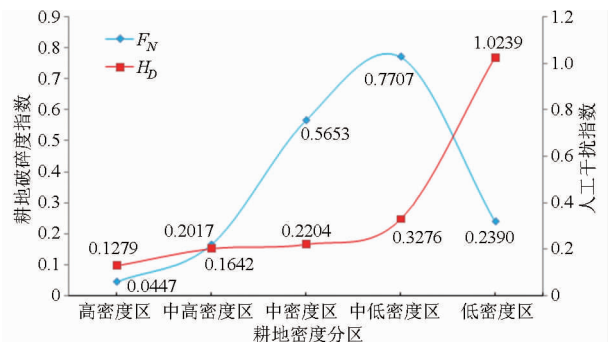


图 5 耕地破碎度指数与人工干扰指数对比  
Fig. 5 Comparative analysis of cultivated land fragmentation and artificial disturbance index



着密度从高到低逐渐增加,从曲线变化趋势分析,耕地破碎度在高密度区和中高密度区较为平缓,从中密度区到低密度区急剧升高。 $H_d$ 的变化显示,人工干扰程度随着耕地密度从高到低持续增加,从变化趋势分析,人工干扰度从高密度区到中低密度区变化平稳,且逐渐上升,从中低密度区到低密度区骤升。

通过对 $F_N$ 和 $H_d$ 的对比可知,耕地高密度区和中高密度区受人工干扰比较小,耕地空间连续性较好,破碎化程度低;但 $H_d$ 高于 $F_N$ ,说明在这2个密度区耕地破碎化受干扰的主要因素是人工地表造成的。从中密度区到中低密度区受人工干扰持续增

加,破碎化程度明显加剧;但 $H_d$ 低于 $F_N$ ,说明人工干扰只是其中一方面的因素,随着耕地密度的降低,其他地表类型,如林地、草地、园地、湿地等,对耕地破碎化也产生了影响。在低密度区,随着耕地在数量上的锐减和空间上的散布,其受到人为干扰的程度依然很高并且复杂。

### 3.4 耕地整治方向与建议

通过对不同密度区的耕地空间分布特征、破碎化程度分析以及人工干扰程度分析,本文对京津冀地区耕地整治方向和基本农田建设提出建议,具体见表1。

表1 不同密度区耕地特点和土地整治方向

Tab.1 Cultivated land characteristics and land consolidation strategies of different density zones

| 分区    |       | 耕地特点          | 土地整治方向及建议          |
|-------|-------|---------------|--------------------|
| 高密度区  | 平原区   | 集中连片,破碎化程度低   | 高标准基本农田建设,发展现代农业   |
| 中高密度区 | 平原区   | 集中连片,破碎化程度较低  | 高标准基本农田建设,发展现代农业   |
|       | 高原区   | 分片集中,破碎化程度较低  | 基本农田建设,提升质量,生态管护   |
| 中密度区  | 平原区   | 相对聚集,破碎化程度较低  | 基本农田保护,中低产田改造,提升质量 |
|       | 高原谷地区 | 相对集中,破碎化程度居中  | 基本农田保护,完善生态条件,提升质量 |
|       | 城市外围区 | 区位条件好,破碎化程度居中 | 综合整治,提升质量,发挥农田生态功能 |
| 中低密度区 | 浅山坡地区 | 早坡地为主,破碎化程度较高 | 生态整治,保护性开发治理,水土保持  |
|       | 高原山地区 | 散布范围大,破碎化程度较高 | 综合整治,发展特色农业,适度退林退草 |
|       | 城市近郊区 | 零散分布,破碎化程度较高  | 综合整治,提升复合价值,发展休闲农业 |
| 低密度区  | 山地丘陵区 | 分布稀少,破碎化程度高   | 生态整治,退林退草,适度发展特色农业 |
|       | 沿海滩涂区 | 干扰大盐碱化,破碎化程度高 | 综合治理,保护耕地提升质量,合理开发 |
|       | 城市边缘区 | 零星分布,破碎化程度高   | 生态整治,挖掘农耕文化,提升环境质量 |

## 4 结论

(1)耕地主要分布在京津冀地区中部和东南部的平原区,耕地密度与比重分布特征一致,绝大多数集中分布在中密度区到高密度区,耕地面积随着密度由高到低渐减。采用核密度估计法计算耕地密度,可以清晰反映耕地在空间上的聚集程度,并通过密度分区,为分析耕地破碎度在不同密度区的变化特征提供合理的评价基础。

(2)从斑块数量、斑块边界特征、形状复杂性和聚集性4个方面选取耕地破碎化评价指标,定量分析不同核密度区的耕地破碎化程度,京津冀地区耕

地破碎化程度随着耕地密度由高到低逐渐增大。根据耕地在各密度区呈现不同的特点,为该地区的耕地整治方向和基本农田建设提出建议。

(3)人类活动的强弱与耕地破碎化程度密切相关,耕地破碎度和人工干扰度均随着耕地密度由高到低逐渐增大;耕地破碎化程度在高原区和中高密度区较低,主要受人工干扰因素大;从中密度区到低密度区破碎化程度明显加剧,人工干扰持续增加,但人工干扰只是其中一方面的因素;随着耕地密度的降低,耕地由主体基质逐渐演变为镶嵌斑块,人类活动和其他地表类型对破碎化的影响变得更加复杂。

## 参 考 文 献

- 陈志. 我国农业可持续发展与农业机械化[J]. 农业机械学报, 2001, 32(1): 1-4, 15.  
CHEN Zhi. A sustainable development of agriculture and agricultural mechanization in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(1): 1-4, 15. (in Chinese)
- 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5363-5374.  
LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area: a case study in Shunyi District of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5363-5374. (in Chinese)
- GERI F, AMICI V, ROCCHINI D. Human activity impact on the heterogeneity of a Mediterranean landscape[J]. Applied

- Geography, 2010, 30: 370 - 379.
- 4 仇江啸,王效科,逯非,等.城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例[J].生态学报,2012,32(9):2659 - 2669.
- QIU Jiangxiao, WANG Xiaoke, LU Fei, et al. The spatial pattern of landscape fragmentation and its relation with urbanization and socioeconomic developments: a case study of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2659 - 2669. (in Chinese)
- 5 石峡.大都市区域耕地破碎化程度动态演变及驱动机制研究[D].保定:河北农业大学,2011.
- 6 文魁,祝尔娟.京津冀蓝皮书——承载力测度与对策[M].北京:社会科学文献出版社,2013.
- 7 吕晓,黄贤金,钟大洋,等.中国农地细碎化问题研究进展[J].自然资源学报,2011,26(3):530 - 540.
- LV Xiao, HUANG Xianjin, ZHONG Taiyang, et al. Review on the research of farmland fragmentation in China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 530 - 540. (in Chinese)
- 8 孙强,蔡运龙,王乐.北京耕地流失的时空特征与驱动机制[J].资源科学,2007,27(4):158 - 163.
- SUN Qiang, CAI Yunlong, WANG Le. Temporal-spatial processes of farmland conversion and its driving mechanisms in Beijing [J]. Resources Science, 2007, 27(4): 158 - 163. (in Chinese)
- 9 FRONDONI R, MOLLO B, CAPOTORTI G. A landscape analysis of land cover change in the Municipality of Rome (Italy): Spatio-temporal characteristics and ecological implications of land cover transitions from 1954 to 2001[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(1 - 2): 117 - 128.
- 10 李鑫,欧名豪,马贤磊.基于景观指数的细碎化对耕地利用效率影响研究——以扬州市里下河区域为例[J].自然资源学报,2011,26(10):1758 - 1767.
- LI Xin, OU Minghao, MA Xianlei. Analysis on impact of fragmentation based on landscape index to cultivated land use efficiency—a case on Lixiahe District in Yangzhou City[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1758 - 1767. (in Chinese)
- 11 张海鑫,杨钢桥.耕地细碎化及其对粮食生产技术效率的影响——基于超越对数随机前沿生产函数与农户微观数据[J].资源科学,2012,34(5):903 - 910.
- ZHANG Haixin, YANG Gangqiao. The effects of land fragmentation on technical efficiency of food production: an empirical analysis based on stochastic frontier production function and micro-data of households[J]. Resources Science, 2012, 34(5): 903 - 910. (in Chinese)
- 12 邓劲松,王珂,沈掌泉,等.桐乡市乡镇耕地整理对耕地景观格局的影响及其分析[J].农业工程学报,2005,21(3):79 - 82.
- DENG Jinsong, WANG Ke, SHEN Zhangquan, et al. Impact of farmland consolidation on farmland landscape: a case study in Tongxiang County[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 79 - 82. (in Chinese)
- 13 DEMETRIOU D, STILLWELLI J, SEE L. A new methodology for measuring land fragmentation[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2013, 39: 71 - 80.
- 14 LATRUFFE L, PIET L. Does land fragmentation affect farm performance? A case study from Brittany[J]. Agricultural Systems, 2014, 129: 68 - 80.
- 15 刘世梁,刘琦,王聪,等.基于地理加权回归的漫湾库区景观破碎化及影响因子分析[J].地理科学,2014,34(7):856 - 862.
- LIU Shiliang, LIU Qi, WANG Cong, et al. Landscape fragmentation and affecting factors of Manwan reservoir based on geographically weighted regression[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(7): 856 - 862. (in Chinese)
- 16 黄思琴,陈英,张仁陟,等.基于景观指数的耕地细碎化与农业经济水平的空间相关性分析[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):238 - 244.
- HUANG Siqin, CHEN Ying, ZHANG Renzhi, et al. Spatial correlation analysis of land fragmentation and agriculture development based on landscape indexes[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 238 - 244. (in Chinese)
- 17 邬建国.景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- 18 李鑫,欧名豪,肖长江,等.基于景观指数的细碎化对耕地生产效率影响研究[J].长江流域资源与环境,2012,21(6):707 - 713.
- LI Xin, OU Minghao, XIAO Changjiang, et al. Analysis on impact of fragmentation based on landscape index to cultivated land use efficiency[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6): 707 - 713. (in Chinese)
- 19 DEMETRIOU D, SEE L, STILLWELL J. A parcel shape index for use in land consolidation planning[J]. Transactions in GIS, 2013, 17(6): 861 - 882.
- 20 SILVERMAN B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. London: Chapman and Hall, 1986.
- 21 ZHANG X P, HUANG P T, SUN L, et al. Spatial evolution and locational determinants of high-tech industries in Beijing[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(2): 249 - 260.
- 22 蔡雪娇,吴志峰,程炯.基于核密度估算的路网格局与景观破碎化分析[J].生态学杂志,2012,31(1):158 - 164.
- CAI Xuejiao, WU Zhifeng, CHENG Jiong. Analysis of road network pattern and landscape fragmentation based on kernel density estimation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(1): 158 - 164. (in Chinese)
- 23 CHANG K T. Introduction to geographic information systems[M]. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2015.
- 24 傅伯杰,陈利顶,马克明,等.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.