doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.015

# 基于形态-结构-功能多维评价体系的耕地保护分区研究

刘慧芳　毕如田　郭永龙　王　瑾
(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

**摘要**: 耕地保护分区是科学实施耕地保护措施和引导耕地可持续利用的重要依据。以晋中市为研究区域,从耕地形态、耕地结构和利用功能 3 个维度构建耕地保护分区评价指标,并在三维特征耦合分析基础上,将耕地保护区划分为 4 种类型。结果表明:耕地形态受地形地貌影响,聚集型斑块主要分布在汾河沟谷和黄土堆积地貌区,散布型耕地斑块分布在剥蚀构造和剥蚀侵蚀地貌区;耕地质量在空间上呈现弱的正相关性,集聚类型以 HH 和 LL 为主,累计面积占比为 60.19%,HL 和 LH 型零星分布在全区域;功能协调区域主要分布在晋中市西部,其耕地综合利用潜力较大,功能不协调区主要表现为生态功能高于生产、经济功能或经济功能高于生态、生产功能两种情况;根据耕地形态、耕地结构和利用功能等三维耦合分类,将晋中市耕地保护区分为永久农田建设区、土地整治潜力区、农业结构调整区和生态修复退耕区,其中永久农田建设区面积占比最大,为 48.79%。

**关键词**: 耕地保护分区; 多维评价; 形态; 结构; 功能
**中图分类号**: F301.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)02-0168-10　　**OSID**:

# Protection Zoning of Cultivated Land Based on Form – Structure – Function Multidimensional Evaluation System

LIU Huifang　BI Rutian　GUO Yonglong　WANG Jin
(*College of Resource and Environment*, *Shanxi Agricultural University*, *Taigu* 030801, *China*)

**Abstract**: The protection zoning of cultivated land resources is an important basis for scientific implementation of cultivated land protection and guiding the sustainable utilization of cultivated land. Taking Jinzhong City as the study area, the evaluation indexes for cultivated land partition were constructed from the three dimensions of cultivated land form, spatial structure and cultivated land function. On the basis of three dimensional feature coupling analysis, the cultivated land protection area of Jinzhong City was divided into four types. The results showed that the cultivated land form was under the influence of geomorphology. The aggregation patches were mainly distributed in the Fen River valley and the loess accumulation geomorphologic area, while the diffuse patches were distributed in the denudation tectonic and the denudation erosion geomorphologic areas. There was a weak positive spatial correlation among the quality of cultivated land in Jinzhong City, in which the HH and LL aggregation types were main types. The HL and LH types were scattered in various regions. The functional coordination area were mainly distributed in the western Jinzhong City, with great potential for comprehensive utilization of cultivated land, while the functional incoordination area involved four counties. The incoordination was featured by two conditions of either the ecological function was higher than the productive and economic functions or the economic function was higher than the ecological and productive functions. According to the three-dimensional coupling classification of form, structure and function, the cultivated land protection area of Jinzhong City was divided into permanent cultivated land construction area, potentiality of land consolidation area, agricultural structure adjustment area and ecological de-farming area. The permanent cultivated land construction area was the main agricultural production area of Jinzhong City.

**Key words**: cultivated land protection zoning; multidimensional evaluation; form; structure; function

收稿日期: 2020-04-24　修回日期: 2020-06-29
**基金项目**: 山西省软科学一般项目(2018041069-3)
**作者简介**: 刘慧芳(1982—),女,副教授,主要从事土地可持续利用研究,E-mail: liuhuifang0354@sxau.edu.cn
**通信作者**: 毕如田(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事资源环境信息技术、土地复垦与规划研究,E-mail: brt@sxau.edu.cn

## 0　引言

耕地是保障粮食安全和促进农民持续增收的基础要素，也是国土空间规划的重要对象。2019 年 10 月自然资源部出台的《市县国土空间总体规划编制指南(征求稿)》中明确提出，“优化农业格局，结合资源禀赋、水土光热条件、地形地貌、农田水利设施条件等，综合分析本地既有的永久基本农田保护区、粮食生产功能区和重要农产品生产保护区等。因地制宜、合理确定农业生产格局”，“促进耕地集中连片整治，实现数量不减、质量不降、布局稳定”，继续推动耕地保护，以保障粮食安全和社会经济稳定发展。

近年来，国内学者对耕地保护研究主要集中在耕地质量评价及提升路径、耕地保护分区和耕地多功能利用等方面。在耕地质量评价中，国内学者较关注对耕地生产、生态与健康综合质量的保护[1]，采用多要素综合评价法，选取耕地立地条件、耕作便利度、田块规整度或主导限制因素等指标[2-3]对耕地质量进行评价；也有学者关注到耕地质量评价与空间集聚特征[4]，并提出耕地质量提升等具体措施[5]。在分区方面，国内学者根据评价目标构建多维评价指标体系、测算耕地质量，并根据指标变化趋势对耕地利用区进行划分，提出差别化耕地利用保护措施[6-9]。耕地利用分区类型包括耕地质量分区[10]、耕地多功能分区[11]、耕地后备资源利用分区[12]、耕地生态补偿分区[13]以及多维评价下的耕地利用综合分区；评价方法多采用综合指数法、熵值法、层次分析法、模糊数学法及多因素综合评价等[14]。基于多指标评价结果，采用聚类分析、空间自相关[15]、矩阵组合及叠加分析[16]等方法确定耕地利用分区，耕地评价的多元性和丰富性为耕地保护分区提供了划分理论依据。随着对耕地研究的深入，耕地的多功能性也逐渐得到重视，张利国等[11]采用聚类法和灰色关联法对湖北省耕地的多功能性进行评价和分区；马仁锋等[17]将耕地功能分为物质产出功能、生态环境功能、景观美学功能和劳动力承载功能，并采用莫兰指数对耕地功能的空间格局演变进行分析。

综上所述，耕地既是重要的生产资料，在物质形态上表现为农地田块，具有规模和空间特征；又是社会、经济和自然要素的载体，呈现出生产、经济和生态等功能。耕地保护分区是国土空间规划编制和耕地差别化管理的重要依据。耕地的复合特征决定了仅从单一维度对其进行评价和分区无法对其进行全面深入的认识和评价。基于此，本研究从耕地的形态、结构和功能 3 方面构建相应指标体系，以行政村为评价单元对晋中市耕地保护分区进行定量化分析和综合性描述。

## 1　研究区概况与数据来源

### 1.1　研究区概况

晋中市位于山西省中部，东依太行山，西傍汾河，北与省会太原市毗邻(图 1)。晋中市辖区总面积 $1.64\times10^4$ km$^2$，行政区划分为 11 个县(市、区)，118 个乡镇，2 749 个行政村。地处华北平原西侧，地貌类型复杂多样，山地占 65%，高原和丘陵占 10%，盆地、台地、平原占 25%。根据地貌形态、成因及岩性特征，全市分为 4 个地貌单元：东部山地属剥蚀侵蚀地貌；中部盆地属剥蚀构造地貌；西南部和西北部黄土高原与丘陵属堆积侵蚀地貌；西部由韩候岭隆起形成的汾河峡谷属堆积地貌。

2018 年晋中市耕地面积 3 721.34 km$^2$，占行政区总面积 22.96%。其中旱地 2 463.97 km$^2$，占耕地总面积 66.21%；水浇地 1 257.36 km$^2$，占耕地总面积 33.79%；水田为 0.009 km$^2$，占比忽略。从空间分布上看，耕地主要分布在西部平川地区，占晋中市耕地总面积 60.12%；而晋中市东部和西南部耕地面积相对较小，占比为 39.88%。

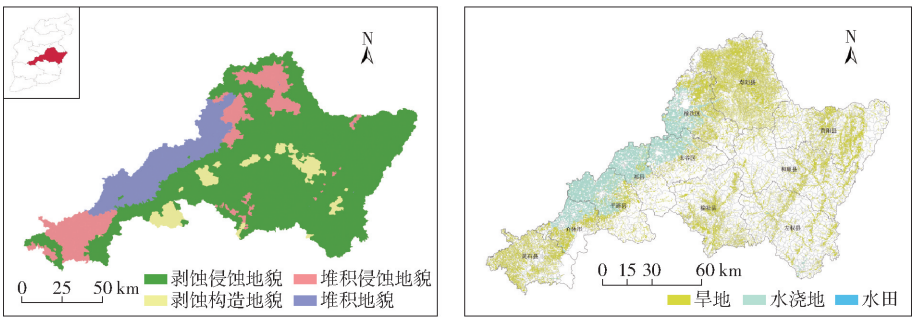



图 1　研究区概况

Fig. 1　Study area overview

### 1.2　数据来源

(1)耕地分布图来源于 2018 年晋中市土地利用现状图和晋中市地形图，耕地质量数据来源于 2017 年晋中市农用地分等定级成果。

(2)基于数据可获性,以县为单位收集社会经济类数据。生产功能和经济功能指标来源于 2018 年晋中市统计年鉴,生态功能相关指标来源于第三次晋中市农业普查统计资料。对上述指标体系数据进行整理汇总,基于 ArcGIS 10.2 构建晋中市耕地保护分区基础数据库。

(3)数据预处理:对所有 ArcGIS 图进行地图投影和坐标校正,统一采用 1980 坐标系;对所有社会经济类数据进行单位统一,主要数据处理软件为 ArcGIS 10.2 和 GeoDa 1.6.7。

### 1.3 研究单元

市域耕地研究的最小研究单元有两种:空间网格和行政区划。根据本研究目标,一方面耕地利用分区过程中除了考虑自然属性外,还需要涉及到众多社会经济属性,而且社会经济统计数据都是以行政单元划分,如果采用空间网格划分,会影响社会经济数据与空间网格的叠加精度,也会将大面积集中连片的耕地割裂,形成边界格网的属性值突变[18];另一方面,耕地图斑合并到行政村后,村级耕地质量指数比乡级质量指数更接近国家质量指数[19]。因此本文研究单元选择为行政村。

村级耕地国家自然等质量指数计算公式为

$$x_i = \frac{x_{ij}a_{ij}}{\sum a_{ij}} \tag{1}$$

式中 $x_i$——第 $i$ 个行政村耕地国家自然等指数平均值

$x_{ij}$——第 $i$ 个行政村第 $j$ 个耕地斑块的国家自然等指数值

$a_{ij}$——第 $i$ 个行政村第 $j$ 个耕地斑块面积,$m^2$

## 2 研究思路与研究方法

### 2.1 研究思路

耕地是农业生产活动的基础要素,耕地资源保护是根据耕地的自然条件、空间结构和功能载体等特征,采取一定措施对耕地资源进行合理保护利用,促使其达到可持续利用状态。

耕地自然条件包括土壤质地、有机质含量、可耕作层厚度、田块形态等,其中田块形态是影响现代农业生产效率的重要因素之一,主要包括田块规模、田块形状和田块连通性等。一般情况下耕地形态规整程度越高,农业机械投入程度越高,耕地集约利用程度提升,耕地生产率随之提高,农户保护耕地的积极性提高[20]。耕地质量是耕地保护的核心内容,耕地质量空间特性的差异也显示耕地生产能力的区域差别,为保护分区提供了有效依据。空间上集中连片的高质量耕地具有生产稳定、规模经营和耕作便利等特点,是重要的农业生产资源,应优先保护;同时耕地作为载体,承载着粮食作物、生产活动、人口产业和植被生物等要素,具有生产、经济和生态功能,可用功能指标来反映[21]。随着耕地多元化利用发展,多重功能交错,存在主次强弱,耕地功能非均衡发展会阻碍生产要素有效流动,降低耕地综合利用潜力,因此在耕地保护过程中,以促进耕地多功能协同发展、提升耕地综合利用潜力为目标,采取对应措施优化耕地功能协同发展。

总而言之,耕地开发、利用和保护是耕地从单一要素扩展到空间整合集聚至复合要素综合强化的过程。因此,本研究从形态、结构和功能 3 方面选取评价指标,利用景观指数表现耕地形态;利用局部 Moran's $I$ 指数分析耕地质量空间相关性,以反映耕地结构[22-23];利用功能综合指数法和耦合协调度模型分别计算功能指数和功能协调度;最后使用自然段点法分别将形态、结构和功能划分为不同类型,并在形态、结构和功能 3 个维度基础上采用三维魔方分类法对耕地进行耦合分区(图 2)。

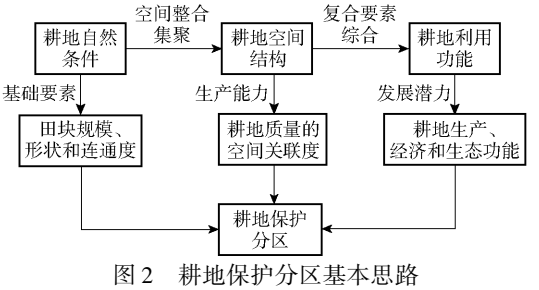



图 2 耕地保护分区基本思路

Fig. 2 Analysis of zoning of cultivated land resource

### 2.2 指标构建

耕地形态包括田块规模、田块形状和田块连通性等,因为各个行政村田块面积相差较大,一般山区小于平原,而且山区村庄的山地丘陵占比较大,耕地斑块分布相对分散,为消除一些离散斑块对计算结果的影响,研究中选取面积加权平均斑块面积、面积加权平均斑块分维数和面积加权斑块平均距离 3 个指标体现耕地的形态特征;耕地结构主要表现为不同质量耕地的空间集聚程度,选取局部 Moran's $I$ 指数反映耕地质量空间集聚特征;利用功能主要表现为耕地生产、经济和生态功能的耦合协调性,反映耕地综合利用潜力,具体如表 1 所示。其中耕地的生产功能主要表现为粮食生产能力、经济产出能力和资源禀赋程度,经济功能反映耕地生产对地区社会经济的贡献度;生态功能主要表现为耕地在生物多样性和生态环境保护等方面的贡献。因此,从粮食生产、产业产值、资源禀赋、人口就业、耕地面积和生态设施 6 方面,按照生产、经济和生态 3 个维度选取 9 个指标,建立耕地多功能评价指标体系,利用熵权法[24]确定权重,采用综合指数法计算功能指数。

**表 1　耕地保护分区评价指标**

**Tab. 1　Assessing indicators of cultivated land protection zoning**

| 目标 | 指标 | | 量化方法 | 释义 |
|---|---|---|---|---|
| 耕地形态 | 面积加权平均斑块面积 | | $A_R=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{a_i}a_{ij}$；$a_{ij}$为第 $i$ 个行政村第 $j$ 个图斑面积；$a_i$ 为第 $i$ 个行政村耕地总面积；$n$ 为某一行政村内耕地斑块总数 | 值越大，耕地破碎度越小 |
| | 面积加权平均斑块分维数 | | $F_R=\sum_{j=1}^{n}(2\ln(0.25l_{ij})/\ln c_{ij})\left(c_{ij}\Big/\sum_{j=1}^{n}c_{ij}\right)$；$l_{ij}$为景观类型 $i$ 的第 $j$ 个斑块的周长；$c_{ij}$为景观类型 $i$ 的第 $j$ 个斑块的面积 | 值越大，耕地形态越复杂；值越小，耕地形态越简单 |
| | 面积加权斑块平均距离 | | $K=\frac{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}k_i}{a_i}$　$Q=\frac{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}q_i}{a_i}$　$E_N=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(k_i-K)^2+(q_i-Q)^2}}{a_i}$；$k_i$和 $q_i$是第 $i$ 个耕地斑块重心的横坐标值和纵坐标值；$a_i$ 为第 $i$ 个行政村耕地面积总和；$K$ 和 $Q$ 为该行政单元内所有耕地斑块的面积加权重心的横坐标值和纵坐标值；$E_N$ 为该行政村内所有耕地的面积加权平均斑块距离 | $E_N$ 越大，耕地空间分布越分散；$E_N$ 越小，耕地空间分布越集聚 |
| 耕地结构 | 局部 Moran's $I$ | | | 值为正，空间关联度越强；值为负，空间关联度越弱 |
| 利用功能 | 生产功能 | 粮食单产 | 粮食总产量与粮食播种面积比值 | 值越高，耕地生产能力越强 |
| | | 耕地地均农业产值 | 第一产业产值与耕地面积比值 | 值越高，耕地经济生产能力越强 |
| | | 人均耕地面积 | 耕地面积与总人口比值 | 值越高，耕地资源禀赋越高 |
| | 经济功能 | 农业产值占比 | 农业总产值与地区生产总值比值 | 值越高，对耕地经济产值依赖程度越高 |
| | | 农业从业人口比例 | 农业从业人口与农业户籍人口比值 | 值越高，耕地吸纳劳动力能力越高，社会保障能力越强 |
| | | 耕地在农林牧副渔产值中占比 | 农业产值与农林牧渔业总产值比值 | 值越高，粮食经济产值越高，产业趋于单一化 |
| | 生态功能 | 耕地面积占比 | 耕地面积与总面积比值 | 值越高，生态多样性越低 |
| | | 单位耕地面积化肥施用量 | 化肥施用折纯量与耕地面积比值 | 值越高，生态安全性越低 |
| | | 地膜覆盖面积 | | 值越高，生态安全性越低 |

## 2.3　研究方法

### 2.3.1　形态特征分析方法

采用鞠洪润等[25]对斑块的划分方法，以行政村为单元，利用 Fragstats 4.2 计算斑块类型水平的耕地形态指数，利用自然断点法对其进行划分，将田块形态特征类型分为 5 类，划分方式如表 2 所示。首先根据 $E_N$ 将土地利用网格划分为散布型和集聚型；然后在集聚型图斑基础上根据 $A_R$ 和 $F_R$ 分出 4 种类型。基于划分标准将耕地形态特征分为简单大斑块型、复杂大斑块型、简单小斑块型、复杂小斑块型和散布型 5 种类型。

### 2.3.2　空间自相关分析

根据耕地质量分值，计算耕地质量单元与周围单元间空间关联程度，以此分析耕地质量的空间结构特征。本文采用局部空间自相关（LISA）分析每一局部单元与邻近单元的相关程度，反映局部空间位置的高值或低值集聚[26]。具体公式为

$$I_i=\frac{x_i-\bar{x}}{s_i^2}\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\boldsymbol{w}_{ij}(x_j-\bar{x}) \tag{2}$$

其中

$$s_i^2=\frac{\sum_{j=1,j\neq i}^{n}(x_j-\bar{x})}{n-1} \tag{3}$$

式中　$n$——村庄数量，为 2 749 个

$x_j$——第 $j$ 个行政村耕地国家自然等指数值

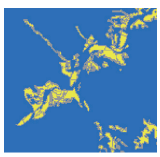
$\bar{x}$——耕地国家自然等指数值的平均值

$\boldsymbol{w}_{ij}$——区域范围内权重矩阵

$I_i$——耕地质量在局部空间关联程度，取值范围在 -1 ~ 1 之间，$I_i>0$ 为正相关，表示耕地自然等分值与邻近的耕地有类似的高或低分值；$I_i<0$ 为负相关，表示耕地自然等分值与邻近的自然等分值不相同；$I_i=0$ 表示空间随机分布

表 2 耕地形态划分类型及示意图

Tab. 2 Classification and sketch map of cultivated land form

| 形态类型 | 示意图 | 划分标准 | 形态特征 |
|---|---|---|---|
| 简单大斑块 |  | $E_N<0.5$ km, $A_R\geq240$ m$^2$, $F_R<1.05$ | ①$A_R$ 大于等于 240 m$^2$;形状简单;$E_N$ 小于 0.5 km。②田块规模大,形状规整,属于高标准基本农田 |
| 复杂大斑块 |  | $E_N<0.5$ km, $A_R\geq240$ m$^2$, $F_R\geq1.05$ | ①$A_R$ 大于等于 240 m$^2$;形状复杂;$E_N$ 小于 0.5 km。②田块规模较大,形状复杂,其他非耕地土地类型镶嵌其中,生物多样性高,属于农业发展重要区域 |
| 简单小斑块 |  | $E_N<0.5$ km, $A_R<240$ m$^2$, $F_R<1.05$ | ①$A_R$ 小于 240 m$^2$;形状简单;$E_N$ 小于 0.5 km。②田块比较小,形状简单,镶嵌在非耕地土地类型中间;但由于斑块面积小,限制农业机械化发展 |
| 复杂小斑块 |  | $E_N<0.5$ km, $A_R<240$ m$^2$, $F_R\geq1.05$ | ①$A_R$ 小于 240 m$^2$;形状复杂;$E_N$ 小于 0.5 km。②田块比较小,由于受地形限制,形状复杂;一般远离村庄和城镇,较难规模化利用 |
| 散布型 |  | $E_N\geq0.5$ km | ①$E_N$ 大于等于 0.5 km。②耕地斑块分布零散,通达性较差,地形起伏较大,不利于耕地规模化经营 |

注:表示典型田块;表示非典型田块。

局部 Moran's $I$ 显著性检验指数公式为

$$z(I_i)=\frac{1-E(I_i)}{\sqrt{v_{ar}(I_i)}} \tag{4}$$

式中 $z(I_i)$——局部 Moran's $I$ 显著性检验指数

$E(I_i)$——局部 Moran's $I$ 期望值

$v_{ar}(I_i)$——局部 Moran's $I$ 标准差

若 $z(I_i)$ 为正且显著,表示该区域范围内相似值的高值或低值空间集聚;而 $z(I_i)$ 为负且显著,则表示区域范围内相似值的高值和低值交错分布形成空间集聚。

权重采用邻接关系,根据空间邻接性频率直方图分析正态分布特征[17],Queen 原则更加符合正态分布特征,因此选择 Queen 原则确定空间权重。

$$w_{ij}=\begin{cases}1 & (\text{区域 } i \text{ 与 } j \text{ 有公共边或同一个顶点})\\ 0 & (\text{区域 } i \text{ 与 } j \text{ 无公共边且同一个顶点})\end{cases} \tag{5}$$

采用 Geoda 软件进行局部空间自相关分析,根据局部 Moran's $I$ 和 Moran 散点图将耕地分布空间分为 HH、HL、LH、LL 4 个象限。其中,HH 表示高质量耕地集聚;HL 表示高质量耕地被低质量耕地包围;LH 表示低质量耕地被高质量耕地包围;LL 表示低质量耕地集聚。

### 2.3.3 综合指数法

综合指数法主要用于测算耕地的生产、经济和生态功能指数。第 $i$ 个行政村的耕地功能指数 $P_i$ 为

$$P_i=\sum_{i=1}^{n}P_{ij}h_{ij} \tag{6}$$

式中 $P_{ij}$——第 $i$ 个行政村第 $j$ 项指标标准化值,采用极差标准化

$h_{ij}$——指标权重,采用熵值法

### 2.3.4 功能协调度

利用综合指数法计算出功能指数后,采用曲衍波等[27]提出的"三生"空间协调度模型测算耕地功能协调度,并借用自然断裂法将耕地功能划分为协调和不协调两种类型。协调度计算公式为

$$D=\sqrt{TC} \tag{7}$$

其中 $$C=\left[\frac{3(EF+FU+EU)}{E+F+U}\right]^{\varphi}\quad(\varphi\geq3) \tag{8}$$

$$T=\alpha E+\beta F+\gamma U \tag{9}$$

$$\alpha+\beta+\gamma=1$$

式中 $D$——协调度 $C$——耦合度

$T$——耕地多功能综合发展度

$\varphi$——调节系数

$\alpha$、$\beta$、$\gamma$——权重，考虑到功能之间的作用关系和相对发展的重要性，$\alpha$、$\beta$、$\gamma$ 设定为 1/3

$E$、$F$、$U$——生产、经济和生态功能评价指数

**2.3.5** 耕地保护区划分

利用三维魔方空间分类法的基本原理[28]，以耕地形态分类为 $X$ 轴，空间集聚分类为 $Y$ 轴，功能协调度为 $Z$ 轴建立耕地保护分区三维魔方图，组合不同类型（图 3）。

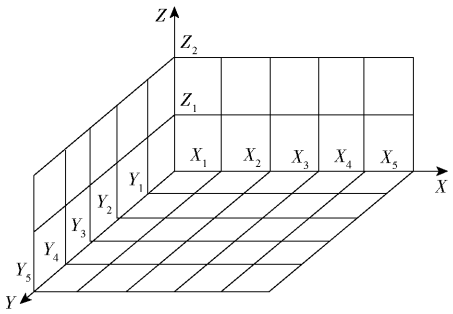



图 3　耕地保护分区三维魔方图

Fig. 3　Three-dimensional cube of cultivated land protection zoning

通过三维魔方图将 $X$、$Y$、$Z$ 轴不同类型进行组合，得到 37 种主要组合类型，按照表 3 规则进行分区，将耕地保护区分为永久农田建设区、土地整治潜力区、农业结构调整区和生态修复退耕区。表 3 中 $X_1$ 为简单大斑块，$X_2$ 为复杂大斑块，$X_3$ 为简单小斑块，$X_4$ 为复杂小斑块，$X_5$ 为散布型，$Y_1$ 为 HH 型，$Y_2$ 为 HL 型，$Y_3$ 为 LH 型，$Y_4$ 为 LL 型，$Y_5$ 为不显著，$Z_1$ 为协调，$Z_2$ 为不协调。

**表 3　晋中市耕地保护分区与三维魔方单元对应表**

**Tab. 3　Corresponding table of cultivated land protection zoning and three-dimensional cube unit in Jinzhong City**

| 分区类型 | 三维魔方单元 | | | 分区特征 |
|---|---|---|---|---|
| | 田块形态类型 | 空间集聚类型 | 功能协调类型 | |
| 永久农田建设区 | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_1$ | $Z_1$ | 田块集中连片，耕地形态多样；高质量耕地空间集聚性规律明显；耕地的生产功能较高，综合利用发展潜力大 |
| | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_2$ | $Z_1$ | |
| | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_1$ | $Z_2$ | |
| | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_2$ | $Z_2$ | |
| 土地整治潜力区 | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_3$ | $Z_1$ | 田块聚集，耕地形态多样；以高低质量交错分布或低质量耕地空间集聚为主要分布特征；耕地的生产、经济和生态功能平衡，发展潜力大 |
| | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_4$ | $Z_1$ | |
| 农业结构调整区 | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_3$ | $Z_2$ | 田块分散且连通性差，耕地形态多样；耕地质量空间分布随机，无明显集聚特征；耕地的生产功能高于生态功能和经济功能 |
| | $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ | $Y_4$ | $Z_2$ | |
| | $X_5$ | $Y_1$、$Y_2$、$Y_3$ | $Z_2$ | |
| 生态修复退耕区 | $X_5$ | $Y_4$ | $Z_2$ | 耕地形态以散布型为主；耕地质量空间分布随机性强；耕地的生态功能高于生产功能和经济功能 |
| | $X_5$ | $Y_5$ | $Z_2$ | |

## 3　研究结果

### 3.1　耕地形态分析

根据耕地形态指标计算分析（图 4a ~ 4c），大斑块耕地面积占耕地总面积 32.79%，主要分布在晋中市西部，构成自寿阳县到平遥县自北向南连线聚集分布模式，因该区属于汾河谷地及黄土堆积地貌地区，地势宽广平坦，有利于田块布局；小斑块耕地面积占耕地总面积 67.21%，主要分布在晋中市南部，属山地丘陵，相对高度差大于 200 m，地势陡峻，侵蚀严重，造成耕地斑块面积偏小。形状简单的耕地面积占耕地总面积 44.75%，主要集中在晋中市西部及东北部，土地类型以耕地为主，其他土地类型镶嵌其中，人工耕作造成田块形状简单；形状复杂耕地面积占耕地总面积 55.25%，主要分布在晋中市中南部和西南部，受山地丘陵地形限制以及与建设用地、林地和草地相互交错，造成耕地形状复杂。斑块连度高的耕地面积占耕地总面积 84.54%，主要分布在晋中市西部，属于黄土堆积地貌和冲积平原地貌，地势相较宽阔平缓，堆积物覆盖广而深，有利于耕地集中分布；斑块连通性低的耕地面积占耕地总面积 15.46%，主要分布在晋中市南部，以高山丘陵地貌为主，地势陡峭，地形分割显著，造成耕地分布相对分散。

基于以上数据，根据表 2 对晋中市耕地形态特征进行分析（图 4d）：①复杂大斑块型耕地面积为 1 010.13 $km^2$，占耕地总面积 27.07%，主要分布在晋中西部，以汾河沟谷地貌为主。②复杂小斑块型耕地面积为 748.76 $km^2$，占耕地总面积 20.06%，主要分布在晋中西部，因为多种土地类型相互聚集，景观多样性程度较高，造成斑块形状复杂。③简单大斑块型耕地面积为 103.15 $km^2$，占耕地总面积 2.77%，主要分布在榆次区、太谷县、祁县和平遥县，以汾河沟谷地貌为主，地势宽阔平缓。④简单小斑块型耕地面积为 1 282.53 $km^2$，占耕地总面积 34.65%，主要分布在晋中市西部和西南部，由山区丘陵地形条件限制造成斑块面积偏小。⑤散布型耕地面积为 576.77 $km^2$，占耕地总面积 15.45%，主要

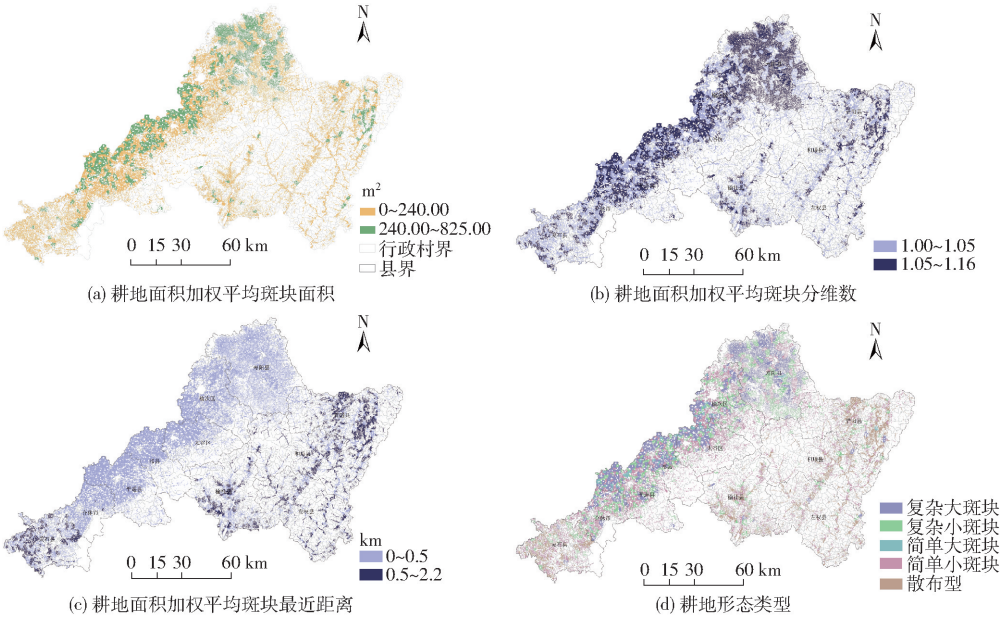



图 4 晋中市耕地形态特征空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of cultivated land form characteristics in Jinzhong City

分布在晋中市东部,主要由地形地貌的约束以及林地、草地对耕地的阻隔,造成耕地之间通达性较差,不利于规模化作业。

### 3.2 局部空间相关性分析

根据 2017 年晋中市耕地质量评价结果,晋中市耕地自然等指数局部空间自相关系数为 0.326,表明耕地质量在空间分布上具有弱正相关性。其中集聚类型为 HH 型和 LL 型累积面积占比为 60.19%,HL 型和 LH 型累积面积占比为 6.24%,非显著类型耕地面积占比为 33.57%(表 4),因此正相关类型中的 HH 型和 LL 型是耕地空间分布的主导类型。

**表 4 晋中市耕地局部空间自相关类型**

**Tab. 4 Cultivated land types of local spatial autocorrelation in Jinzhong City**

| 集聚类型 | 面积/km² | 百分比/% |
|---|---|---|
| HH | 1 576.36 | 42.36 |
| HL | 44.29 | 1.19 |
| LH | 187.93 | 5.05 |
| LL | 663.51 | 17.83 |
| 不显著 | 1 249.25 | 33.57 |
| 总计 | 3 721.34 | 100 |

从空间分布上看(图 5),HH 型耕地主要分布在晋中西部冲积平原地区,在榆次有零星分布,与自然等高分值耕地空间分布格局一致;区内为高质量耕地集聚区,\地势平缓,水源充足,农业基础设施完善,是优质的农耕区。LL 型耕地主要分布在晋中市东部山地丘陵区,由于地形切割剧烈,造成耕地破碎化程度高,且分布相对零散,又缺少充足的农业灌溉水源,同时受水力侵蚀和重力侵蚀混合作用,水土流失较严重,造成耕地质量偏低。HL 和 LH 型面积占比较低,在各地区都有零星分布,一般 LH 型耕地被 HH 型耕地包围,集中连片度高。

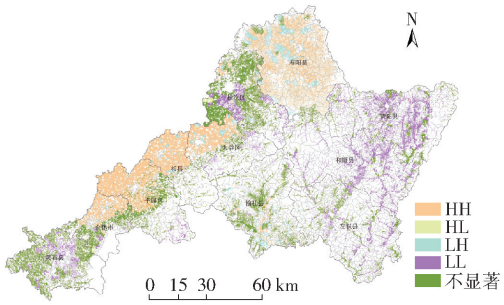



图 5 晋中市耕地质量局部空间相关性分析

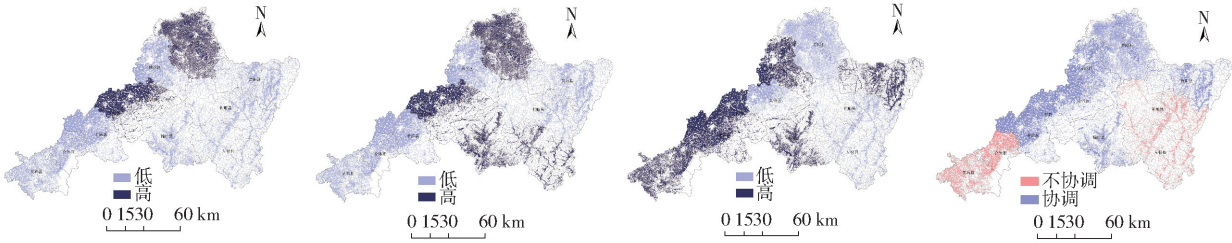
Fig. 5 Local spatial correlation analysis of cultivated land quality in Jinzhong City

### 3.3 功能协调度

根据各功能分值计算结果(图 6a ~ 6c),生产功能较高的地区包括寿阳县、太谷县和祁县,耕地单产均在 8 400 kg/hm²以上,耕地质量高且集约度高;生产功能较弱的耕地由于资源禀赋较差,造成农户利用积极性不高,生产投入不足,表现为耕地复种指数低,撂荒面积增加,耕地利用效率低。经济功能较高的耕地集中在晋中市西部的农业主产区,该区农业生产规模化程度高且农业从业人口比例为 38% ~ 49%,对耕地的经济贡献能力依赖程度较高;耕地经济功能偏低的介休市和灵石县,是以二、三产业为主的经济发达地区,农业从业人口偏低,耕地的社会经济保障作用弱化。耕地生态功能较高的地区中,榆次区、灵石县、介休市由于二、三产业发达,对农业经济的依赖性较低,耕地偏向于承担文化传承、生态景观、休闲旅游等功能;而祁县、平遥县、昔阳县和榆社

县由于耕地破碎化程度高，导致耕地利用粗放，机械、农药和化肥投入偏少，从而耕地的生态功能得到保障；生态功能较低的地区则是由于地膜和化肥施用量偏高，干扰了耕地生态质量。

基于上述综合分析（图 6d），耕地功能协调的区域中寿阳县、太谷县、祁县的经济和生产功能水平较高，二者互相促进，提高耕地多功能协调性，耕地综合性利用发展潜力较大；而其他地区经济能力和生产能力水平偏低，两者的相互促进作用不明显，属于低水平协调。功能不协调的区域中介休市、灵石县的耕地生态功能高于经济和生产功能，而和顺县和左权县的耕地经济功能高于生产和生态功能，耕地的多功能性得不到充分利用，综合开发利用潜力较弱。




(a) 生产功能　(b) 经济功能　(c) 生态功能　(d) 多功能协调度

图 6　晋中市耕地多功能特征空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of multifunctional characteristics of cultivated land in Jinzhong City

### 3.4　耕地保护分区与利用措施

综合考虑耕地的形态、结构和功能，根据表 3 类型组合，将晋中市耕地保护区划分为永久农田建设区、土地整治潜力区、农业结构调整区和生态修复退耕区。其中永久农田建设区和农业结构调整区为主要类型，分别占耕地总面积 48.79% 和 28.61%（表 5，图 7）。

**表 5　晋中市耕地保护分区面积及百分比**

**Tab. 5　Protection zoning of cultivated land in Jinzhong City**

| 保护分区 | 面积/km² | 百分比/% |
|---|---|---|
| 永久农田建设区 | 1 815.64 | 48.79 |
| 土地整治潜力区 | 547.78 | 14.72 |
| 农业结构调整区 | 1 064.68 | 28.61 |
| 生态修复退耕区 | 293.24 | 7.88 |
| 总计 | 3 721.34 | 100 |

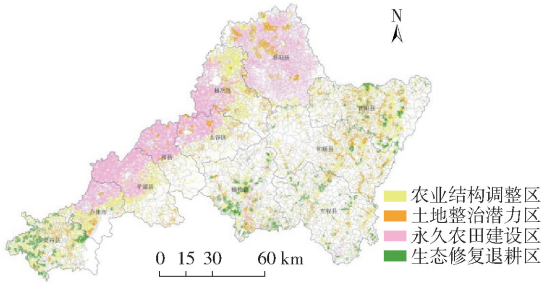



图 7　晋中市耕地保护分区类型空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of different protection zoning of cultivated land in Jinzhong City

（1）永久农田建设区

主要分布在晋中市西部，以汾河沟谷和黄土堆积地貌为主，地势相对平坦，土壤肥沃，紧邻汾河支流，灌溉设施配套完备；由于耕地和建设用地、林草地相互交叉，耕地形态以复杂大斑块和复杂小斑块为主，简单大斑块和简单小斑块分布其中，但田块集中连片度较高；耕地质量空间集聚以 HH 和 HL 为主，具有明显的“高地”聚集特征；功能耦合协调度较高，尤其是生产功能高于经济和生态功能。该区应利用自然禀赋优势，在维持当前耕地高质量水平下，加大农业生产基础设施投入，提高田块通达度、灌溉便利度以及耕地培肥力度，注重耕地绿色生产，降低农药化肥施用量，净化农业环境；积极建设护田林带，美化耕地景观，提升耕地生态服务功能；禁止非农占用耕地。努力将永久农田建设与现代化农业经营相结合，建设规模化、机械化、集约化和信息化的农业示范园区，在保护耕地质量的同时，增强耕地生态功能，提升耕地经济功能，实现耕地高效可持续利用。

（2）土地整治潜力区

主要分布在晋中市东部及西北部，该区地貌以剥蚀侵蚀地貌和堆积侵蚀地貌为主，相对高差较大，坡麓覆盖较厚的黄土、红土，可耕作层厚度平均值大于 30 cm，但流水侵蚀与剥蚀作用发达，造成耕地破碎化程度较高，支谷中滑坡、崩塌现象存在，因此耕地形态以简单小斑块为主，复杂小斑块和散布型为辅；耕地质量空间集聚以 LH 和 LL 型为主，经济功能和生态功能高于生产功能。该区在保护高质量耕地的同时，依据耕地自然立地条件和功能短板，对耕地低质量区域进行土地综合整治，并针对耕地细碎化问题，积极利用工程、生物措施，对田块合并调形和土壤改良；完善农业基础设施，净化农田生态环境，提高农田抗风险能力，提升耕地作物产量，增强耕地生产功能，可划入永久基本农田后备区。

（3）农业结构调整区

主要分布在昔阳县、灵石县、榆次区北部、平遥

县南部、介休市南部等地区,该区地貌以剥蚀侵蚀地貌和堆积侵蚀地貌为主,受地形限制耕地形态以简单小斑块为主,复杂小斑块零星分布其间,且耕地质量空间集聚特征不明显,生态功能高于生产和经济功能。该区域耕地集中连片度较差,很难形成规模化现代农业经营,对于低质量耕地实行轮耕和休耕制度,降低耕地利用强度,保护农田生态环境,促进绿色农业发展;对于高质量耕地可调整优化种植结构,增加特色农产品种植生产,建立品牌特色农业,满足多元化市场需求,提升农业的生产功能和经济功能;利用当地生态资源,将休闲农业、农耕文化、科研学习等产业融入当地农业生产中,全面提升农业生产的质量效率和功能价值。

(4)生态修复退耕区

主要分布在榆社县和灵石县,零星分布在昔阳县、和顺县和左权县等地区。该区以侵蚀构造地貌为主,山顶和缓,山脊以尖山脊居多,山坡陡峻,因此耕地形态以散布型为主,耕地之间连通性较差;耕地质量空间集聚以 LL 型和随机分布为主,且生态功能高于经济和生产功能。此区内耕地的粮食和经济产出相对较差,受田块规模、地形条件、耕作便利度、农业基础设施和区位条件等因素影响,耕地质量偏低。此区域根据耕地空间分布及地形条件,进行综合改造,因地制宜实施生态退耕,加强水土流失治理和植被种植,扩大生态保护面积,实施生态优先战略。

## 4 结论

(1)耕地是自然-经济-生态的复合系统,具有田块形态、集聚特征和利用功能的综合表征。本文从形态、结构和功能等多维度进行分析,对多要素进行综合考量,并采取有针对性的耕地保护措施,建立多维度指标体系,为耕地保护分区提供依据。

(2)根据评价指标分析,晋中市耕地以简单小斑块和复杂大斑块为主,共占耕地总面积的 61.72%;耕地形态受地形地貌影响,集聚型斑块主要分布在汾河沟谷和黄土堆积地貌区域,散布型耕地斑块分布在山区丘陵地带;耕地质量在空间上呈现弱的正相关性;耕地功能协调区域主要分布在晋中市西部,表明该区域耕地综合利用潜力较大。

(3)耕地保护区分为 4 种类型:永久农田建设区是晋中市主要分区类型,以集聚型斑块为主,空间集聚以 HH 和 HL 型为主,分布在晋中西部,占耕地总面积 48.79%,该区需促进生产与生态协同发展,加强耕地质量的健康管控;土地整治潜力区占耕地总面积 14.72%,分布在剥蚀侵蚀地貌和堆积侵蚀地貌区,耕地形态多样、以 LL 型和 LH 型空间集聚为主,该区通过土地综合整治可提升耕地生产水平,促进生产与经济和生态功能的平衡发展;农业结构调整区占耕地总面积 28.61%,分布在剥蚀侵蚀地貌和堆积侵蚀地貌区,以简单小斑块为主,耕地空间集聚不显著,生态功能较高,该区应以品牌特色农业建设为主,结合休闲旅游促进耕地的可持续利用;生态修复退耕区分布在侵蚀构造地貌地区,田块散布,空间集聚以 LL 型和随机分布为主,耕地的生态功能较高,在当今耕地保护转型背景下,有序推进该区休耕退耕对于耕地永续利用具有重要意义。

## 参 考 文 献


[1] 孙晓兵,孔祥斌,温良友. 基于耕地要素的耕地质量评价指标体系研究及其发展趋势[J]. 土壤通报,2019,50(3):739-747.
SUN Xiaobing, KONG Xiangbin, WEN Liangyou. Evaluation index system of cultivated land quality and its development trend based on cultivated land elements[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 739-747. (in Chinese)

[2] 汤江龙,范佳旭,郭恩泽. 基于 Moran's *I* 指数的耕地质量空间相关分析:以于都县为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2019,42(4):406-411.
TANG Jianglong, FAN Jiaxu, GUO Enze. Spatial correlation analysis of cultivated land quality based on Moran's *I* index: taking Yudu County as an example [J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science),2019,42(4):406-411. (in Chinese)

[3] 冯茂秋,黄佩,潘洪义,等. 基于限制因素组合序列的耕地质量提升潜力研究:以什邡市为例[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(5):126-133.
FENG Maoqiu, HUANG Pei, PAN Hongyi, et al. Study on potentials of cultivated land quality IMP rovement based on combination of rest ricted factors: taking Shifang as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019,40(5):126-133. (in Chinese)

[4] 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? file_no=2002015&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.015. (in Chinese)

[5] 李会利. 殷都区耕地保护与质量提升工作的做法与成效[J]. 基层农技推广,2019,7(12):112-114.

[6] 宋聚,罗志军,赵越,等. 基于耕地综合质量及聚类关系的耕地保护分区[J]. 西南农业学报,2019,32(10):2390-2397.
SONG Ju, LUO Zhijun, ZHAO Yue, et al. Cultivated land protection zoning based on comprehensive quality and clustering

relationship of cultivated land[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(10): 2390 - 2397. (in Chinese)

[7] 肖小明,黄朝明. 耕作服务能力视角下屯昌县耕地保护分区[J]. 上海国土资源,2019,40(1):41 - 44.
XIAO Xiaoming, HUANG Chaoming. Farmland protection zoning in Tunchang County from the perspective of tillage service capability[J]. Shanghai Land & Resources,2019,40(1):41 - 44. (in Chinese)

[8] 高建岗,黄锐. 基于耕地质量指数和空间自相关的苏南地区耕地保护分区[J]. 水土保持研究,2019,26(3):213 - 218.
GAO Jiangang, HUANG Rui. Protection zoning of cultibated land based on cultivated land quality index and spatial autocorrelation on southern area of Jiangsu Province[J]. Resrarch of Soil and Water Conservation, 2019,26(3):213 - 218. (in Chinese)

[9] 陈相利,赵华甫,冯喆,等. 基于粮食-城镇化-生态多维压力体系的河南省耕地利用分区管控研究[J]. 河南农业大学学报,2019,53(2):307 - 315.
CHEN Xiangli, ZHAO Huafu, FENG Zhe, et al. Study on zoning control of cultivated land use in Henan Province based on grain-urbanization-ecological multi-dimensional pressure system[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(2): 307 - 315. (in Chinese)

[10] 黄梦佳,李淑杰,杜婉婷,等. 基于限制因素分析的耕地质量提升分区——以长春市九台区为例[J]. 农业资源与环境学报,2019,36(3):272 - 278.
HUANG Mengjia, LI Shujie, DU Wanting, et al. The classification and zoning of cultivated land quality improvement based on limiting factors: a case study of Jiutai District in Changchun City, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3):272 - 278. (in Chinese)

[11] 张利国,王占岐,柴季,等. 湖北省耕地多功能地区差异及综合分区研究[J]. 地域研究与开发,2019,38(5):125 - 130.
ZHANG Liguo, WANG Zhanqi, CHAI Ji, et al. Multifunction spatial differentiation and comprehensive zoning of cultivated land in Hubei Province[J]. Areal Research and Development, 2019,38(5):125 - 130. (in Chinese)

[12] 周浩,雷国平,杨雪昕,等. 基于两维图论的县域尺度耕地后备资源利用分区研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):116 - 124.
ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin, et al. Utilization zoning of reserve resources for cultivated land based on two-dimensional graph theory clustering method at county scale[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 116 - 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170615&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.015. (in Chinese)

[13] 阮羿佑,宋敏,谢锐萤. 海峡西岸耕地生态补偿分区及其时空特征研究[J]. 广东土地科学,2019,18(6):37 - 43.
RUAN Yiyou, SONG Min, XIE Ruiying. Temporal and spatial characteristics of cultivated land ecological compensation division on the west coast of the straits[J]. Guangdong Land Science, 2019,18(6):37 - 43. (in Chinese)

[14] 张红梅,宋戈,王思琢. 基于"质量-产出-效率"的辽宁省耕地利用分区[J]. 农业工程学报,2019,35(13):234 - 242.
ZHANG Hongmei, SONG Ge, WANG Sizhuo. Zoning of cultivated land use in Liaoning Province based on "quality - output - efficiency"[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 234 - 242. (in Chinese)

[15] 陈藜藜,宋戈,邹朝晖,等. 基于改进局部空间自相关分析的萝北县耕地保护分区[J]. 资源科学,2016,38(10):1871 - 1882.
CHEN Lili, SONG Ge, ZOU Chaohui, et al. Zoning of protected cultivated land based on improved local indicators of spatial association[J]. Resources Science,2016,38(10):1871 - 1882. (in Chinese)

[16] 温良友,张青璞,孔祥斌,等. 基于产能与健康综合评价的北京大兴区耕地整治分区[J]. 农业工程学报,2019,35(22):79 - 89.
WEN Liangyou, ZHANG Qingpu, KONG Xiangbin, et al. Arable land consolidation zoning based on comprehensive evaluation of capacity and health[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 79 - 89. (in Chinese)

[17] 马仁锋,姜露露. 杭嘉湖平原耕地多功能时空动态演变分析[J]. 上海国土资源,2019,40(4):21 - 26.
MA Renfeng, JIANG Lulu. Analysis of dynamic evolution of the spatio-temporal pattern of multifunctional tradeoff and synergy of cultivated land in Hangjiahu plain[J]. Shanghai Land & Resources,2019,40(4):21 - 26. (in Chinese)

[18] 施利锋. 中国城镇用地的空间格局演变及潜力[D]. 北京:中国科学院大学,2017.
SHI Lifeng. Chinese urban land spatial pattern, evolution and its potential[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2017. (in Chinese)

[19] 杨建宇, 徐凡,赵龙,等. 基于综合质量空间自相关性分析的耕地保护分区方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):156 - 163.
YANG Jianyu, XU Fan, ZHAO Long, et al. Protection zoning of cultivated land comprehensive quality based on spatial autocorrelation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):156 - 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170320&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.020. (in Chinese)

[20] 文高辉,杨钢桥. 耕地细碎化对农户耕地生产率的影响机理与实证[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(5): 138 - 148.
WEN Gaohui, YANG Gangqiao. Impact mechanism and empirical study of cultivated land fragmentation on farmers' cultivated land productivity[J]. China Population, Resources and Environment,2019,29(5): 138 - 148. (in Chinese)

[21] 向敬伟, 廖晓莉,宋小青,等. 中国耕地多功能的区域收敛性[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 1959 - 1971.
XIANG Jingwei, LIAO Xiaoli, SONG Xiaoqing, et al. Regional convergence of cultivated land multifunctions in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 1959 - 1971. (in Chinese)

(下转第 354 页)

[15] 曾剑华, 刘琳琳, 杨杨, 等. 大豆脂蛋白组分分析及体外抗氧化特性 [J]. 食品科学,2020,41(14):58 - 65.
ZENG Jianhua, LIU Linlin, YANG Yang, et al. Composition and in vitro antioxidant properties of soy lipophilic protein[J]. Food Science, 2020, 41(14): 58 - 65. (in Chinese)
[16] BEVERIDGE T, TOMA S, NAKAI S. Determination of —SH and S—S groups in some food proteins using ellman's reagent [J]. Journal of Food Science, 1974, 39(1): 49 - 51.
[17] ZHAO J, HE S, TANG M, et al. Low-pH induced structural changes, allergenicity and in vitro digestibility of lectin from black turtle bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 183 - 190.
[18] KUELTZO L A, ERSOY B, RALSTON J P, et al. Derivative absorbance spectroscopy and protein phase diagrams as tools for comprehensive protein characterization: a bGCSF case study [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2003, 92(9): 1805 - 1820.
[19] YAMAGISHI T, EBINA F, YAMAUCHI F. Analysis of the state of aromatic amino acid residues in heated soybean 7S globulin by absorption derivative spectrophotometry and spectrofluorimetry [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 2014, 46(10): 2441 - 2448.
[20] ZHANG Y, CHEN S, QI B, et al. Complexation of thermally-denatured soybean protein isolate with anthocyanins and its effect on the protein structure and in vitro digestibility [J]. Food Research International, 2018, 106(4):619 - 625.
[21] GUO F, XIONG Y L, QIN F, et al. Surface properties of heat-induced soluble soy protein aggregates of different molecular masses [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(2): C279 - C287.
[22] DATTA D, M J S. Fluorescence and circular dichroism studies on the accessibility of tryptophan residues and unfolding of a jacalin-related alpha-δ-galactose-specific lectin from mulberry (*Morus indica*) [J]. J. Photochem. Photobiol. B, 2017, 170: 108 - 117.
[23] MORRIS A M, WATZKY M A, FINKE R G. Protein aggregation kinetics, mechanism, and curve-fitting: a review of the literature [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)—Proteins and Proteomics, 2009, 1794(3): 375 - 397.
[24] 林岱. 苦杏仁 11S 球蛋白自组装现象及其应用研究 [D]. 杭州:浙江工商大学, 2018.
LIN Dai. Study on self-assembly property and application of 11S globulin from Chinese apricot kernel [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018. (in Chinese)
[25] HU H, WU J, LI-CHAN E C Y, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 647 - 655.

(上接第 177 页)

[22] 姜广辉,张瑞娟,张翠玉,等. 基于空间集聚格局和边界修正的基本农田保护区划定方法[J]. 农业工程学报,2015,31(23):222 - 229.
JIANG Guanghui,ZHANG Ruijuan,ZHANG Cuiyu,et al. Approach of land use zone for capital farmland protection based on spatial agglomeration pattern and boundaries modification[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 222 - 229. (in Chinese)
[23] 熊昌盛,谭荣,岳文泽. 基于局部空间自相关的高标准基本农田建设分区[J]. 农业工程学报,2015,31(22): 276 - 284.
XIONG Changsheng,TAN Rong,YUE Wenze. Zoning of high standard farmland construction based on local indicators of spatial association[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(22): 276 - 284. (in Chinese)
[24] 倪九派,李萍,魏朝富,等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业工程学报,2009,25(5): 202 - 209.
NI Jiupai, LI Ping, WEI Chaofu, et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5):202 - 209. (in Chinese)
[25] 鞠洪润,左丽君,张增祥,等. 中国土地利用空间格局刻画方法研究[J]. 地理学报,2020,75(1):143 - 159.
JU Hongrun, ZUO Lijun, ZHANG Zengxiang, et al. Methods research on describing the spatial pattern of land use types in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(1):143 - 159. (in Chinese)
[26] 胡长慧. 国土空间集聚的格局及演变过程研究:以宁波市为例[D]. 杭州:浙江大学,2019.
HU Changhui. Study on the pattern and evolution process of territorial spatial agglomeration: a case study of Ningbo[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2019. (in Chinese)
[27] 曲衍波,魏淑文,刘敏,等. 农村居民点多维形态空间格局与耦合类型[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2673 - 2686.
QU Yanbo, WEI Shuwen, LIU Min, et al. Spatial pattern and coupling types of multidimensional morphology of rural residential land[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2673 - 2686. (in Chinese)
[28] 刘倩,张超,马立军,等. 基于模糊评价-三维魔方的村级生态旅游区划研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(8):221 - 228.
LIU Qian, ZHANG Chao, MA Lijun, et al. Study on rural eco-tourism regionalization - three dimensional magic cube[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019,40(8):221 - 228. (in Chinese)