doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.023

晋中市耕地质量空间分异格局与影响因素研究

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: 耕地质量空间分异格局分析对提升耕地保护有效性具有现实意义。以晋中市 2 794 个行政村为研究单元,基于 2017 年晋中市国家耕地质量评价结果,采用累积分布函数、空间自相关、地理探测器及 GIS 分组分析等方法,分析晋中市耕地质量空间分异特征及 16 个因子对其影响及交互作用。研究表明:耕地规模由晋中西部平原地区向东部山区呈“梯度递减”;耕地质量偏向低值集聚,空间正相关性集聚特征显著,其中 HH 型主要分布在晋中北部及西部,LL 型主要分布在东南部及西南部;集聚类型与耕地国家经济等指数分布保持空间一致性。耕地质量空间分异与影响因子密切相关,是多个因子交互作用的结果;从市域看,自然要素的解释力度较强;双因子交互作用驱动力强于单因子,且以非线性增强为主。基于耕地质量空间分异特征,将晋中市分为耕地高质量区、中质量区和低质量区;高质量区的主导因素为有效土层厚度和田块平整度,属自然要素及工程要素驱动型;中质量区的主导因素为有效土层厚度、单位面积农业机械投入量和灌溉保证率,属综合要素驱动型;低质量区的主导因素为地貌、坡度、耕作距离、灌溉保证率和田块平整度,属综合要素驱动型。

关键词: 耕地质量; 空间分异; 影响因素; 地理探测器; 晋中市
中图分类号: F301.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0216-09　　**OSID**:

Spatial Differentiation Pattern and Influencing Factors of Cultivated Land Quality in Jinzhong City

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

Abstract: The analysis of spatial differentiation pattern of quality of cultivated land is of practical significance in improving the effectiveness of cultivated land protection. Taking 2 794 administrative villages in Jinzhong City as a research unit, the 2017 evaluation results of quality of cultivated land in Jinzhong City was used, and means such as cumulative distribution function, spatial autocorrelation, geographic detector and GIS fractional analysis were adopted to analyze the features of spatial differentiation pattern of cultivated land in Jinzhong City, the influence of 16 factors on quality of cultivated land as well as their interaction. It was concluded that the distribution of cultivated land presented “gradient decline”, which meant that the area of cultivated land in Jinzhong City was decreased from the western plain to the eastern mountainous region; the quality of cultivated land in Jinzhong City tended to aggregate in the low-value range, and it showed significant positive correlation aggregation in space, in which the HH type of cultivated land were mainly distributed in the north and west of Jinzhong City, while the LL type were mainly distributed in the southeast and southwest. The aggregation type kept spatial consistency with the distribution of national economic index value. The spatial differentiation pattern of quality of cultivated land was closely related to the influencing factors, which was a result of interaction of multi-factors. In the whole region, natural factors may greatly contribute to the spatial variation of quality of cultivated land in Jinzhong City. The driving force of two-factor interaction was stronger than that of single-factor interaction, and the type of interaction was mainly of nonlinear enhancement. In consideration of the spatial variation features of quality of cultivated land, Jinzhong City was divided into three areas: the high-quality area, the mid-quality area and the low-

收稿日期: 2020-12-08　修回日期: 2021-01-27
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

quality area. For the high-quality area, the main factors were the thickness of effective soil layer as well as the field flatness, and it was driven by both natural factors and engineering factors. For the mid-quality area, the main factors were the thickness of effective soil layer, the agricultural machinery input and the irrigation guarantee rate, and it was driven by the combined factors. For the low-quality area, the main factors were landform, slope, field distance, irrigation guarantee rate and the field flatness, and it was driven by the combined factors.

Key words: cultivated land quality; spatial differentiation; influencing factors; geographical detector; Jinzhong City

0　引言

2020 年受新型冠状病毒肺炎疫情、非洲沙漠蝗虫和持续干旱影响[1]，全球粮食安全面临新困境。据世界粮食计划署预测计算，2020 年全球面临粮食严重威胁的总人数已达 2.65 亿人[2]，全球粮食危机引起人们对粮食安全问题的高度重视。粮食安全的根本在耕地，核心在耕地质量。耕地质量保护一方面要求管理部门掌握耕地质量的空间分布特征[3]；另一方面，由于区域自然资源禀赋存在差异，水资源短缺及时空分布不均衡、水土流失、耕地退化、环境污染直接造成土地抗灾能力减弱和有效灌溉面积锐减，进而驱动耕地质量分布格局发生演变。系统地研究耕地质量的空间分异规律，判别其影响因素，是优化耕地保护格局，确保粮食安全的客观需要，也是当今自然资源保护及可持续利用方面仍需深化研究的课题。

目前对耕地质量的定义尚不统一，但普遍认为耕地质量具有自然、经济和社会等多重属性[4-7]。管理部门认可的耕地质量是依据 GB/T 28407—2012《农用地质量分等规程》，根据全国统一制订的标准耕作制度，以指定作物的光温（气候）生产潜力为基础，通过对耕地的自然质量、利用水平、经济水平逐级订正后综合评定的结果[8]，能够反映耕地质量的自然-经济双重属性，因此本文采用耕地质量分等结果反映耕地质量。然而耕地质量研究还要考虑空间属性[9]。耕地质量与空间区位的关系表现在两个层次：一是耕地质量及其影响因素在空间区位上的特征，从空间上揭示耕地质量空间分异格局；二是耕地质量与空间区位相互作用的过程，理解空间区位如何影响耕地质量。总体而言，已有研究从不同方面解释耕地质量变化特征及成因，成果较为丰富[10-20]，但对耕地质量空间分异规律研究中，缺少考虑影响因素及因素耦合作用对耕地质量的影响，不利于系统分析区域耕地质量空间分布形成机制。

地理探测器是探测空间分异性及其驱动力的一组统计学方法[21]，近年来已广泛应用于耕地评价、生态环境、社会经济、自然资源及医疗健康等领域[22-24]，该模型可探测数值型单因子、定性型单因子、两因子交互作用对因变量的影响，因此本文借用该模型揭示耕地质量的空间分异规律及影响因素。

本文以晋中市村域为研究单元，借助累积分布函数统计分析耕地质量集疏变化趋势；运用地理探测器揭示耕地质量的主导影响因素，并提出差别化的提质建议，以期丰富耕地质量空间分异研究的技术方法，为耕地保护提供科学参考。

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，东经 112°38′～113°12′，北纬 36°51′～37°24′，市辖区总面积 1.64×10^4 km^2，行政区划分为 11 个县（市、区）、118 个乡镇、2 749 个行政村。区内太行山横贯东部山区，地势从东向西由高到低，形成了具有山区、丘陵和平川的复杂地形，属大陆性季风气候区，但区内差异较大而且特点明显，自然要素分布极不平衡（图 1）。本区各地年平均气温为 3～11℃，年均降水量为 440～600 mm，无霜期 110～160 d，活动积温在 1 860～3 960℃之间。

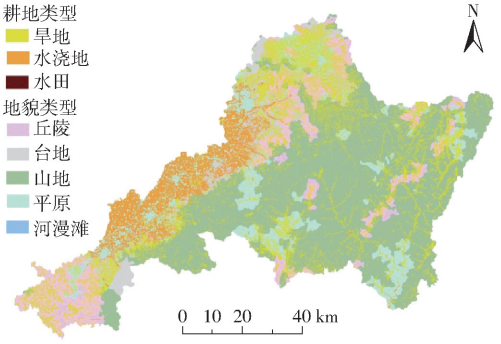


图 1　晋中市地貌类型及耕地分布

Fig. 1　Landform types and cultivated land distribution in Jinzhong City

2017 年晋中耕地面积 3721.34 km^2，占行政区总面积的 22.96%，主要集中在西部平川地区。其中旱地 2 463.97 km^2，占耕地总面积的 66.21%；水浇地 1 257.36 km^2，占耕地总面积的 33.79%；水田为 0.009 km^2，占比忽略，耕地主要分布在晋中西部平原地区。

1.2 数据来源

晋中市耕地国家经济等指数数据来源于《2017 年晋中市耕地质量更新评价成果》,自然要素中地貌类型来源于《晋中地区地貌类型图》,坡度、海拔及耕地面积来源于 2017 年晋中市土地利用现状图,年均降水量及年积温来源于《晋中市各气象要素统计表(2017 年)》,土壤有机质含量、土壤有效土层厚度、盐渍化程度、表层土壤质地来源于 2017 年晋中市耕地等别更新监测数据的空间插值栅格数据;社会要素中田块规模、田块形状和耕作距离基于 2017 年晋中市耕地分布图,利用 Fragstate 4.2 分别计算 AREA - AM(面积加权平均斑块面积)、FRAC - AM(面积加权平均斑块分维数)和 ENN - AM(面积加权平均斑块最近距离)得到,农业机械投入量来源于《晋中市第三次农业普查综合资料(2016 年)》;工程要素中灌溉保证率来源于《晋中市统计年鉴(2017)》,道路通达度利用直线衰减公式[25]计算得出,田块平整因子来源于 2017 年晋中市土地整治项目数据库。上述要素数据统一利用 ArcGIS 工具,按行政村范围统计。

2 研究单元与方法

2.1 研究单元与影响要素

为保持区域的完整性和连续性,以 2017 年晋中市土地利用现状为基础,以 2749 个村域为研究单元;由于耕地属于自然经济综合实体,其经济质量在土地业务中应用更加广泛,实用性更强,因此选择耕地国家经济等指数反映耕地质量水平。从自然要素、社会要素和工程要素 3 方面选取 16 个因子分析对耕地质量的影响[7,26-27]。自然要素是耕地质量的基础,直接决定耕地自然质量,包括地貌、坡度、海拔、年均降水量、积温、土壤有机质含量、土壤有效土层厚度、盐渍化程度、表层土壤质地;社会要素主要体现在耕地资源经营管理过程中对耕地利用方式的管理,包括耕作距离、田块规模、田块形状、单位面积农业机械投入量。耕作距离表示地块之间的距离,反映耕地的集中连片程度,通常集中程度越高越有利于耕地保护;田块规模反映耕作的便利性,一般田块规模越大耕作便利度越高;田块形状表明人类对田块利用调形的程度,也反映耕地利用历史中形成的人地关系;单位面积农业机械投入量可反映经营投入程度。工程要素主要指水利、道路等基础设施建设,以及田块平整等措施,能够有效调节光、温、水等耕地生态环境,提升耕地生产稳定性,包括灌溉保证率、道路通达度、田块平整度。

2.2 研究方法

2.2.1 累积分布函数

累积分布函数(CDF)是随机变量落在样本空间某一区间内的概率之和,是概率密度函数的积分,即

$$F_X(a) = P(X \leqslant a) \tag{1}$$

式(1)表示为对离散变量而言,所有小于等于 a 的值出现概率的和。

本文借助耕地质量分布情况分析晋中市村域耕地质量的集疏变化趋势。具体步骤为,首先将研究区耕地国家经济等指数以分值 100 为固定间隔,将村域耕地质量分成 12 份,其次统计每一个间隔区域内的单元频次和分布概率,最后采用累计分布函数求取处于某一耕地质量范围内的所有单元频次的累积百分比,直观显示出耕地质量的分布状况。

2.2.2 空间自相关分析

衡量事物之间空间自相关性的方法包括全局自相关和局部自相关 2 种,空间邻接关系可分为 Rook、Queen 和 Bishop 等 3 种邻接关系。全局自相关重点描述研究区耕地国家经济等指数的整体区域空间特征,侧重分析整个区域中耕地国家经济等指数的分布状态及趋势;局部空间自相关则用于度量每个空间单元与邻近空间单元的相关性,侧重分析村域经济等指数均值的集聚和孤立形成的空间异质性。具体公式如下[28]:

全局 Moran's I 指数

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} w(i,j)} \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} w(i,j)(X_i - \overline{X})(X_j - \overline{X})}{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2} \tag{2}$$

局部 Moran's I 指数

$$I_i = \frac{X_i - \overline{X}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{X_i - X}{N-1}}} \sum_{j=1}^{N} w(i,j)(X_j - \overline{X}) \tag{3}$$

式中 N——村庄数目,取 2 794

X_i、X_j——村庄 i 和村庄 j 的耕地国家经济等指数

$\overline{X}$——所有村庄耕地国家经济等指数均值

$w(i,j)$——空间权重

I——全局 Moran's I 指数

I_i——局部 Moran's I 指数

I 取值范围为[-1,1],I 大于 0 表示空间正相关,呈集聚态势;等于 0 表示空间不相关,呈随机分布;小于 0 表示空间负相关,呈离散态势。I_i 取值范围为[-1,1],I_i 大于 0 表示耕地质量同质集聚(高-高集聚 HH 或低-低集聚 LL),等于 0 表示空间

集聚不显著，小于 0 表示耕地质量异质集聚（高-低集聚 HL 或低-高集聚 LH），越趋向 1 或 -1 表示空间集聚越显著且空间异质性越大。

基于 ArcGIS 10.2 和 GeoDa 软件计算 Rook、Queen 和 Bishop 的一阶邻接空间邻接性，其中依据 Rook 原则计算的空间邻接性频率直方图更符合正态分布，故选择 Rook 原则计算空间权重。

2.2.3　地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及其驱动力的一组统计学方法，其可以探测数值型或定性型因子及两因子的交互作用。地理探测器包括分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器。本研究采用分异及因子探测器和交互作用探测器。

分异及因子探测器：探测影响因子 Z 对因变量空间分异的解释程度，用 q 度量，表达式为

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

式中　L——影响因子 Z 的分区（类）数

N_h、σ_h^2——第 h 个分区内的村庄个数和方差

σ^2——整个研究区方差

q 取值范围为 [0,1]，越趋向 1，表示影响因子对耕地质量的解释力越强，反之则越弱；q 值为 0 表示影响因子与耕地质量没有关系。影响因子 Z 需采用多种分类方法转换为类型变量，因变量为耕地国家经济等指数。

交互作用探测器：探测影响因子 Z_1 和 Z_2 共同作用时对耕地质量的影响是增强还是减弱，或是对耕地质量的影响是独立的。首先分别计算影响因子 Z_1 和 Z_2 对耕地质量的 $q(Z_1)$、$q(Z_2)$ 和 $q(Z_1 \cap Z_2)$，其次比较 $q(Z_1)$、$q(Z_2)$ 与 $q(Z_1 \cap Z_2)$ 大小，形成 5 类对比关系，代表 5 种作用类型，如表 1 所示。

表 1　因子交互作用探测类型

Tab. 1　Types of interaction between two covariates

判据	交互作用
$q(Z_1 \cap Z_2) < \min(q(Z_1), q(Z_2))$	非线性减弱
$\min(q(Z_1), q(Z_2)) < q(Z_1 \cap Z_2) < \max(q(Z_1), q(Z_2))$	单因子非线性减弱
$q(Z_1 \cap Z_2) > \max(q(Z_1), q(Z_2))$	双因子增强
$q(Z_1 \cap Z_2) = q(Z_1) + q(Z_2)$	独立
$q(Z_1 \cap Z_2) > q(Z_1) + q(Z_2)$	非线性增强

2.2.4　GIS 分组分析

分组分析是基于连通图（最小跨度树）原理查找自然分组，根据对象的属性因素和空间特征进行综合聚类分析，生成不同的组数，分组的结果要求组内要素属性具有相似性、组间要素属性具有差异性、空间上具有连续性，因此通过分组分析形成的分区更有利于自然资源管理和政策实施[29]。空间约束条件使分组结果在空间上相邻，主要包括仅当要素与组中的另一成员共享某条边（CONTIGUITY_EDGES_ONLY）或共享某条边或某个折点（CONTIGUITY_EDGES_CORNERS）等 2 种面邻接类选项。分组的有效性主要通过伪 F 统计量测量，反映组内相似性和组间差异性的比率。

3　结果与分析

3.1　耕地质量空间分布特征

3.1.1　耕地质量统计分析

2017 年晋中市耕地国家经济等指数在 188 ~ 1 391 之间，其中高于 788 的耕地主要分布在晋中北部黄土高原区和西部汾河谷地及平原，在东南部山区有零星分布；低于 788 的耕地主要分布在晋中东部山区和南部丘陵区。自东向西，村域耕地质量与海拔的变化趋势一致，表明地形条件与耕地质量分异密切相关（图 2）。

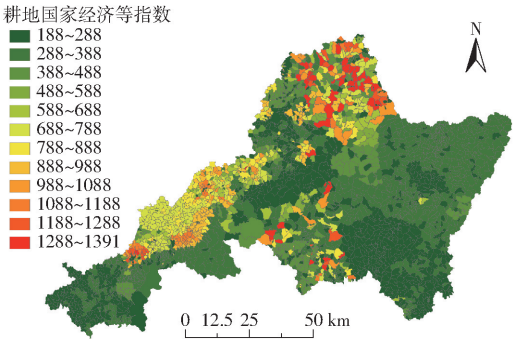


图 2　晋中市耕地国家经济等指数空间分布

Fig. 2　Spatial distribution map of economical cultivated land index in Jinzhong City

从直方图（图 3）来看，耕地国家经济等指数在 188 ~ 788 范围内分布的村庄最多，共 2 241 个，占 80.21%；788 以上的村庄只有 553 个，占 19.79%。由此可知晋中市耕地质量偏向低值集聚分布；村域耕地质量峰度指数为 1.56，偏度指数为 1.55，表明晋中市耕地质量呈尖峰右偏尾，集中分布程度明显。

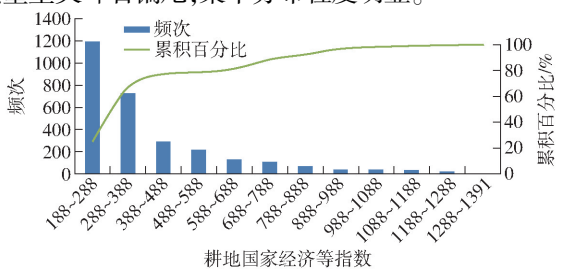


图 3　晋中市耕地国家经济等指数直方图

Fig. 3　Histogram of economical cultivated land index in Jinzhong City

3.1.2 耕地质量空间相关性分析

在1%的显著水平下,晋中市耕地质量的全局Moran's I指数为0.552,表明全市耕地质量在空间上呈现正相关,空间格局相对集聚,耕地质量具有一定空间约束性。

根据表2、图4,属于正相关型HH和LL的耕地面积共167 928.19 hm^2,占45.13%;负相关型HL和LH的耕地面积共14 734.87 hm^2,占3.96%。耕地质量显著高值集聚区主要分布在晋中北部的寿阳及西部的太谷区、祁县和平遥县等地区,少量分布在晋中中南部的榆社县,耕地国家经济等指数主要在432.80~1 391.00范围,表明HH型与高指数值保持空间一致性;显著低值集聚区主要分布在晋中东南部的榆社县、西南部的介休市和灵石县,以及晋中中部有零星分布,耕地国家经济等指数主要在13.34~422.56范围,LL型与低指数值的空间分布也保持较好的一致性;有极少数显著HL和LH集聚区零星分布在寿阳县和太谷区;无显著特征型地区面积为189 459.44 hm^2,占50.91%,耕地国家经济等指数范围为12.61~1 391.00,空间分布呈随机状态。总体而言,耕地国家经济等指数高的耕地与HH型保持了较好的空间一致性,而耕地国家经济等指数低值空间分布与LL型结果相一致,局部空间自相关结果较好反映了耕地质量空间集聚特征。

表2 晋中市耕地质量与集聚类型统计分析

Tab.2 Statistical aggregation types and classification of cultivated land quality in Jinzhong City

集聚类型	面积/hm^2	百分比/%	耕地国家经济等指数
HH	123 604.56	33.22	432.80~1 391.00
HL	1 814.76	0.49	476.25~1 138.00
LH	12 920.11	3.47	31.99~429.44
LL	44 323.63	11.91	13.34~422.56
不显著	189 459.44	50.91	12.61~1 391.00
总计	372 133.50	100	

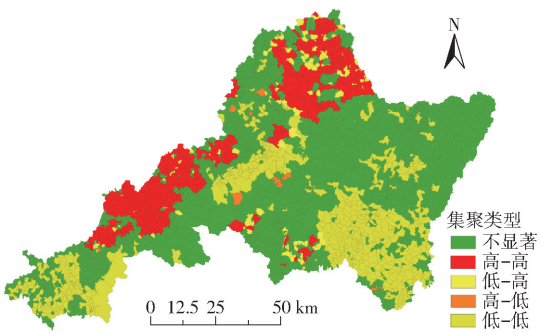


图4 晋中市耕地质量局部空间相关性分析

Fig.4 Local spatial correlation analysis of cultivated land quality in Jinzhong City

3.1.3 耕地质量分区

为了避免传统空间聚类分析只考虑耕地属性相似性,忽略耕地空间单元的相邻性,导致分区结果在空间不能有效集中而过于分散,采用ArcGIS 10.2的分组分析工具,在保证行政村空间相邻的前提下,根据耕地质量属性和空间约束对研究区耕地质量进行分区。以"CONTIGUITY_EDGES_CORNERS"为空间约束方式,根据分组结果的伪F统计量最大值或邻近值确定研究区耕地质量空间的有效分组。结果表明:2~15组的伪F统计量在321.26~609.90之间变化,其中3组(593.39)和4组(609.90)的伪F统计量最大,根据耕地质量空间分布的差异性,最后确定有效组数为3,并根据各组耕地国家经济等指数平均值分别命名为高质量区、中质量区和低质量区。由图4和图5可知,耕地高质量区和低质量区的分布特征和耕地质量的空间集聚特征基本相符,表明分组结果能够客观地反映区域耕地质量的差异。其中耕地高质量区主要分布在晋中西部汾河谷地和平原区,中质量区主要以晋中北部黄土堆积区和东部山区为主,低质量区主要位于南部山地丘陵一带。3个分区耕地质量的空间集聚性总体上弱于晋中地区整体水平,高质量区和低质量区均在1%的显著水平下表现出较强的空间集聚性,表明这两个分区的耕地质量在空间上的集聚模式较突出;中质量区呈现随机分布状态,不同级别的耕地质量交错分布,空间集聚特性不明显,具体特征值见表3。

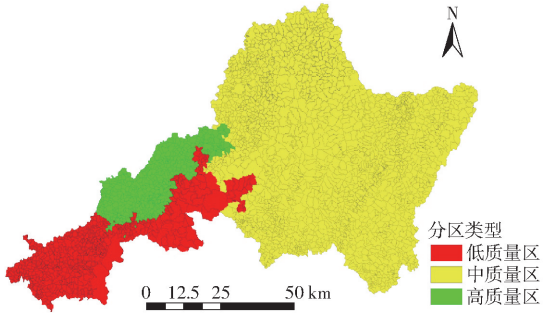


图5 晋中市耕地质量分区

Fig.5 Cultivated land quality zoning of Jinzhong City

表3 不同耕地质量分区的空间集聚特征

Tab.3 Characteristics of spatial aggregation types in different cultivated land quality zonings

分区类型	国家经济等指数平均值	村庄个数	Moran's I指数	Z
高质量区	786.60	460	0.440	6.14
中质量区	364.00	1 833	0.102	1.73
低质量区	351.31	501	0.321	2.75
晋中市	431.31	2 794	0.552	16.33

3.2 因子探测

将各村的耕地国家经济等指数Y作为因变量,

16 个要素作为自变量，根据地理探测器要求因变量是数值量，自变量是类型量，本文基于已有资料、规程标准[26]和自然断裂法对自变量进行分类。其中地貌 X_1 参考已有资料分为河漫滩、平原、丘陵、山地和台地；海拔 X_2 的分类断点为 200、500、1 000 m；坡度 X_3 的分类断裂点为 2°、5°、8°、15°、25°；表层土壤质地 X_7 分为砂土、壤土、黏土和砾质土；田块平整度 X_{16} 分为已平整、未平整；其余变量均采用自然断裂法分为 4 类。另以晋中市及其 3 个分区对应的耕地国家经济等指数为因变量，探讨各因子对耕地质量的影响作用，探测结果见表 4。

表 4　耕地质量分区因子 q 值

Tab. 4　Factor detection results of cultivated land quality zoning

因子	高质量区	中质量区	低质量区	晋中市
地貌 X_1	0. 060	0. 077	0. 073	0. 012
海拔 X_2	0. 084	0. 054	0. 325	0. 383
坡度 X_3	0. 068	0. 114	0. 569	0. 436
年均降水量 X_4	0. 067	0. 043	0. 236	0. 230
积温 X_5	0. 088	0. 143	0. 603	0. 397
有效土层厚度 X_6	0. 211	0. 259	0. 250	0. 203
表层土壤质地 X_7	0. 121	0. 073	0. 377	0. 021
有机质含量 X_8	0. 062	0. 056	0. 088	0. 054
盐渍化程度 X_9	0. 048	0. 110	0. 673	0. 054
耕作距离 X_{10}	0. 268	0. 114	0. 569	0. 436
田块规模 X_{11}	0. 035	0. 202	0. 058	0. 102
田块形状 X_{12}	0. 048	0. 095	0. 154	0. 173
单位面积农业机械投入量 X_{13}	0. 030	0. 200	0. 080	0. 150
道路通达度 X_{14}	0. 029	0. 049	0. 047	0. 028
灌溉保证率 X_{15}	0. 213	0. 260	0. 621	0. 326
田块平整度 X_{16}	0. 016	0. 035	0. 005	0

注：表中因子的 q 在 $P=0.1$ 下均显著相关。

3.2.1　因子空间分异探测

由表 4 可知，2017 年各类因子对晋中地区耕地质量的影响程度及显著性存在较大差异。在 3 大类因子中，自然要素类因子的解释力均表现为显著，其中海拔 X_2、坡度 X_3、积温 X_5 和年均降水量 X_4 的解释力均较强（$q>0.3$），表明地理环境决定晋中地区的耕地质量空间格局；社会要素类因子均具有显著性作用，但仅耕作距离 X_{10} 的解释力最强，反映耕作距离直接影响耕地的集中连片程度及农业空间稳定性；工程要素中仅田块平整度 X_{16} 的 q 值较小，表明田块平整对耕地质量的作用相对较弱，这可能与田块平整工程的区域性有关。

不同耕地质量分区影响因子的解释力分析如下：①对于耕地高质量区中因子解释力从大到小总体依次为自然因素、社会因素、工程因素，自然要素中的 9 个因子均具有显著性且以有效土层厚度 X_6 和表层土壤质地 X_7 的解释力较强，社会要素中的 4 个因子解释力均具有一定显著性作用且以耕作距离 X_{10} 解释力较强，工程要素投入中仅灌溉保证率 X_{15} 的 q 值大于 0. 3；总体表明优质的自然条件是该区耕地质量提升的主要驱动力，区域耕地集中连片程度高为耕地规模经营和集约利用提供基础条件从而提升耕地生产能力，而水仍是该区耕地质量的主要障碍因素，加大灌溉基础设施投入会显著提升该区的耕地质量水平。②耕地中质量区中因子解释力从大到小依次为社会要素、自然要素、工程要素，有效土层厚度 X_6、田块规模 X_{11} 和单位面积农业机械投入量 X_{13} 的解释力较强，表明在耕地中质量区人类劳动投入农业生产过程中，依据自然适宜性调整耕地利用的影响因素进而改变耕地质量空间格局分布，但工程要素不是该区耕地质量空间分异的主要驱动力。③耕地低质量区因子解释力从大到小依次为自然要素、工程要素、社会要素，自然要素的坡度 X_3、积温 X_5 和盐渍化程度 X_9，社会要素中耕作距离 X_{10} 和田块形状 X_{12} 及工程要素的灌溉保证率 X_{15} 解释力均较高，且均比高质量区和低质量区的解释力高，表明该区的自然条件、田块破碎化及水等因素都深刻影响现有耕地质量空间格局，加大灌溉工程建设对该区耕地质量水平及空间格局会产生深远的影响。

3.2.2　交互作用

16 个因子对晋中区域及 3 个分区的耕地质量的交互作用类型表现为双因子增强或非线性增强，表明各因子对研究区耕地质量的影响存在一定的联系，彼此之间并非完全独立（图 6，图中蓝色代表单因子作用，黄色代表非线性增强，灰色代表双因子增强，受篇幅限制未表示出各分区的交互探测结果）。

对于整个晋中区域，剔除未通过显著性检验的影响因子（田块平整度 X_{16}），通过交互探测模型得出耕地质量空间分异的交互探测结果，结果表明双因子交互作用均比单因子作用强，交互作用类型以非线性增强为主。与单因子作用相比，每个影响因子与其他因子共同作用的 q 值均有不同程度升高，其中地貌 X_1 对因子交互作用的影响最强，与其他因子交互作用时的 q 值与单独作用时的 q 值相比增加了数倍，说明不同的地貌条件影响水热条件及耕作的便捷性，进而影响耕地质量空间格局分异；其次为有效土层厚度 X_6、表层土壤质地 X_7 和盐渍化程度 X_9，与其他影响因子共同作用时 q 值也呈倍数增长，说明自然要素对耕地质量空间分异影响最强；从交互类型看，地貌 X_1、有效土层厚度 X_6、表层土壤质地 X_7、盐渍化程度 X_9 与其他因子两两相交均呈现非线

q	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_1	0.012														
X_2	0.412	0.383													
X_3	0.483	0.470	0.436												
X_4	0.292	0.457	0.502	0.230											
X_5	0.488	0.486	0.494	0.562	0.397										
X_6	0.128	0.522	0.487	0.298	0.492	0.203									
X_7	0.052	0.404	0.490	0.367	0.443	0.346	0.021								
X_8	0.077	0.471	0.559	0.339	0.473	0.169	0.099	0.054							
X_9	0.169	0.425	0.498	0.399	0.442	0.347	0.254	0.160	0.054						
X_{10}	0.483	0.470	0.436	0.502	0.494	0.487	0.490	0.559	0.498	0.436					
X_{11}	0.124	0.436	0.467	0.287	0.420	0.185	0.127	0.150	0.201	0.467	0.102				
X_{12}	0.218	0.460	0.452	0.374	0.447	0.269	0.203	0.248	0.256	0.452	0.266	0.173			
X_{13}	0.198	0.423	0.468	0.330	0.418	0.239	0.173	0.204	0.233	0.468	0.163	0.287	0.150		
X_{14}	0.053	0.387	0.449	0.272	0.409	0.142	0.056	0.102	0.098	0.449	0.152	0.226	0.201	0.028	
X_{15}	0.433	0.513	0.533	0.593	0.562	0.560	0.371	0.430	0.454	0.533	0.449	0.463	0.475	0.345	0.326

图 6 晋中市耕地质量影响因子交互探测结果

Fig. 6 Interactive detection results of cultivated land quality in Jinzhong City

性增强类型,表明自然要素是决定耕地质量的核心因素,强化其他因素的作用力度。

从各耕地质量分区来看,田块平整度与田块形状($X_{16}\cap X_{12}$)、单位面积机械投入量($X_{16}\cap X_{13}$)、道路通达度($X_{16}\cap X_{14}$)之间的交互作用在 3 个分区均表现为非线性增强,说明这 4 个因子对耕地质量提升有着重要影响,而田块平整度与其余 3 个因子相结合为 3 个区的耕地质量提升提供强适宜的平台,积极促进耕地质量水平提高,构建健康的耕地生产环境。

在高质量区中,因子交互作用以双因子增强为主要类型,自然要素和社会要素也具有较强的相关关系,交互作用的驱动力相对较弱,作用类型为双因子增强;工程要素中的田块平整度 X_{16} 和社会要素各因子的交互作用均表现为非线性增强,由于优质的自然条件对耕地质量贡献较大,社会因素和自然因素耦合作用就相对不明显,而田块平整克服耕地利用中的障碍因素,直接提升耕地本底质量并改善经营管理条件,工程要素和社会要素相互作用更能强化耕地质量保护。在中质量区中,因子交互作用类型以双因子增强为主,自然要素与其他类型因子的交互作用表现为非线性增强类型的比例高于其他分区,其中年均降水量 X_4、表层土壤质地 X_7 与其他因子的交互作用更强;社会要素中田块形状与灌溉保证率($X_{12}\cap X_{15}$)、田块形状与田块平整度($X_{12}\cap X_{16}$)、单位面积农业机械投入量与灌溉保证率($X_{13}\cap X_{15}$)、单位面积农业机械投入量与田块平整度($X_{13}\cap X_{16}$)的交互作用表现为非线性增强,总体表明在中质量区,自然条件在短时间不会产生显著变化,对耕地质量的影响深刻但稳定,因此只有因地制宜提出有效的经营管理措施,调整耕地权属关系,积极提升耕地质量进而推动农业生产力发展。在低质量区,作用类型为双因子增强为主,自然要素中的地貌 X_1 及有效土层厚度 X_6 和其他因子交互作用后解释力显著提升;工程要素中的田块平整度 X_{16} 与地貌 X_1、年均降水量 X_4、有效土层厚度 X_6、田块规模 X_{11}、田块形状 X_{12}、单位面积农业机械投入量 X_{13}、道路通达度 X_{14}、灌溉保证率 X_{15} 的交互作用类型为非线性增强。因此要重视地貌 X_1、有效土层厚度 X_6 与田块平整度 X_{16} 的耦合对低质量区耕地质量的提升作用。

3.3 分区主导因子识别及优化策略

根据各因素的 q 值、显著性和交互作用,选择解释力显著且大于 0.2 的因子作为各分区的主导因素。高质量区的主导因素为有效土层厚度 X_6 和田块平整度 X_{16},中质量区的主要因素为有效土层厚度 X_6、单位面积农业机械投入量 X_{13} 和灌溉保证率 X_{15},低质量区的主要因素为地貌 X_1、坡度 X_3、耕作距离 X_{10}、灌溉保证率 X_{15} 和田块平整度 X_{16}。总体上可判定高质量区为自然要素及工程要素驱动型,中质量

区和低质量区为综合要素驱动型。

综上分析，制定差别化耕地质量提升策略：①耕地高质量区的地形地貌及水热条件优越，为永久基本农田保护区。当前，有效土层厚度 X_6 与田块平整度 X_{16} 为双因子增强作用，说明两者间的交互作用可有效提高耕地质量，但还需优化。未来可依托国家高标准农田建设项目，改善耕地自然条件，提高耕地抗灾能力，通过田块平整与有效土层厚度的正向耦合交互来提高耕地质量。②耕地中质量区耕地资源丰富但地形条件复杂，多为黄土堆积区及丘陵山区，且受到水热条件及地形地貌等自然要素的诸多限制，未来该区可依托土地综合整治，增加经营管理力度和工程要素投入，适当加大农业机械投入和农业灌溉基础设施建设，多方位推动耕地质量提升；受地形地貌限制较大的区域，可借助乡村振兴政策，深度挖掘耕地的休闲等非生产功能。③耕地低质量区受自然、经营和工程等方面的多约束，建议结合地理环境特点和自身发展需求，借助技术创新增强耕地经营管理力度，适度推动耕地质量提升工程建设，有效耦合自然要素、社会要素和工程要素，提升该区耕地质量水平。

4　讨论

（1）耕地质量空间分布格局是自然要素、社会要素和工程要素等在空间上综合作用的过程，客观反映了耕地质量的空间分异格局，但自然要素是决定耕地质量的核心因素，只有社会、工程要素与自然要素耦合作用，才能改变土地贫瘠情况，减少耕地质量区域分异较大的空间格局，为现代农业发展夯实基础。

（2）社会要素对耕地质量的解释度较自然要素和工程因素偏弱，今后在耕地自然质量提升的基础上，需加大社会要素投入的强度，提升耕地单产水平及产品品质，调整人地关系，促进农业现代化发展，确保耕地可持续利用与保护。

5　结论

（1）从整个市域来看，基于 2017 年晋中市土地利用现状图及耕地质量评价成果，耕地分布呈现“梯度递减”特征，主要集中在晋中西部平原地区并向东部山区递减；耕地质量集中分布特征显著且偏向低值集聚，耕地国家经济等指数平均值低于 788 的村庄占 80.21%；耕地质量在空间上呈现正相关且空间格局相对集聚，HH 型主要分布在晋中北部及西部，LL 型主要分布在晋中东南部及西南部，集聚类型与耕地国家经济等指数分布保持空间一致性。

（2）晋中市耕地质量空间分布具有一定的空间分异性和集聚性，基于 GIS 分组分析的耕地质量分区能够客观反映市域耕地质量差异总体趋势；高质量区主要分布在晋中西部汾河谷地和平原区，低质量区主要位于南部山地丘陵一带，两区空间集聚特征显著；中质量区主要集中在晋中北部黄土堆积平原及东部山区，空间分布呈随机状态。

（3）市域耕地质量空间分异与影响因子密切相关，是多个因子交互作用的结果。从整体区域看，自然因子对晋中市耕地质量空间分异解释力度较强。从各分区来看，耕地高质量区的自然因素解释力较强，主要影响因素为有效土层厚度 X_6、表层土壤质地 X_7、耕作距离 X_{10} 和灌溉保证率 X_{15}；中质量区的社会因素解释力较强，主要影响因素为有效土层厚度 X_6、田块规模 X_{11} 和单位面积农业机械投入量 X_{13}；低质量区的自然因素解释力较强，坡度 X_3、积温 X_5、盐渍化程度 X_9、耕作距离 X_{10}、田块形状 X_{12} 和灌溉保证率 X_{15} 对该区耕地质量空间分异的解释度较高。双因子交互作用驱动力强于单因子，交互作用类型以非线性增强为主，耕地质量的影响因素呈多元复合性。

（4）综合考虑单因子的 q 值、显著性和交互作用，判定高质量区为自然要素及工程要素驱动型，中质量区和低质量区为综合要素驱动型。

参　考　文　献

[1] 张利晨，王延庆，乔晓晖. 经济下行、疫情和重大自然灾害与全球粮食危机[J]. 黑龙江粮食，2020(3)：8－12.

[2] 王国敏，侯守杰. 新冠肺炎疫情背景下中国粮食安全：矛盾诊断及破解路径[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版)，2021，42(1)：120－133.
WANG Guomin，HOU Shoujie. Ensuring China’s food security in the global COVID－19 crisis：contradictions and resolutions [J]. Journal of Xinjiang Normal University(Philosophy and Social Sciences)，2021，42(1)：120－133.（in Chinese）

[3] 杨元智，陈运春，廖丽君，等. 西南片区耕地等别空间分布特征[J]. 水土保持研究，2020，27(12)：226－232.
YANG Yuanzhi，CHEN Yunchun，LIAO Lijun，et al. Characteristics of spatial distribution of arable land grade in Southwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation，2020，27(12)：226－232.（in Chinese）

[4] 李丹，刘友兆，李治国. 耕地质量动态变化实证研究——以江苏省金坛市为例[J]. 中国国土资源经济，2004，17(6)：22－25.

[5] 吴群，郭贯成，刘向南，等. 中国耕地保护的体制与政策研究[M]. 北京：科学出版社，2011.

[6] 陈印军，肖碧林，方琳娜，等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学，2011，44(17)：3557－3564.

CHEN Yinjun, XIAO Bilin, FANG Linna, et al. The quality analysis of cultivated land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17):3557 - 3564. (in Chinese)
[7] 杜国明,刘彦随,于凤荣,等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. 农业工程学报,2016,32(14):243 - 249.
DU Guoming, LIU Yansui, YU Fengrong, et al. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 243 - 249. (in Chinese)
[8] 中华人民共和国国土资源部. 中国耕地质量等级调查与评定[M]. 北京:中华人民共和国国土资源部,2009.
[9] 杨江燕,殷守强,张利,等. 基于空间聚类分层抽样的黄骅市县域耕地质量等别监测样点布设[J]. 资源科学,2019,41(2):257 - 267.
YANG Jiangyan, YIN Shouqiang, ZHANG Li, et al. The layout of city area cultivated land quality monitoring samples in Huanghua City based on spatial clustering stratified sampling[J]. Resources Science, 2019, 41(2):257 - 267. (in Chinese)
[10] 陈印军,肖碧林,方琳娜,等. 基于 ESDA 的湖南省耕地质量空间差异分析[J]. 中国农业科学,2011,44(17):3557 - 3564.
CHEN Yinjun, XIAO Bilin, FANG Linna, et al. The quality analysis of cultivated land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17):3557 - 3564. (in Chinese)
[11] 杨永侠,孙婷,张丽红,等. 京津冀地区耕地质量空间分布分形机制研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):165 - 171.
YANG Yongxia, SUN Ting, ZHANG Lihong, et al. Fractal mechanism of spatial distribution of arable land quality in Beijing - Tianjin - Hebei region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):165 - 171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.022. (in Chinese)
[12] 谢晓彤,朱嘉伟. 耕地质量影响因素区域差异分析及提升途径研究——以河南省新郑市为例[J]. 中国土地科学,2017,31(6):70 - 78.
XIE Xiaotong, ZHU Jiawei. The analysis on regional differences of the factors affecting cultivated land quality and the improvement paths: a case study of Xinzheng City, Henan Province[J]. China Land Science, 2017, 31(6):70 - 78. (in Chinese)
[13] 李武艳,朱从谋,王华,等. 浙江省耕地质量多尺度空间自相关分析[J]. 农业工程学报,2016,32(23):239 - 245.
LI Wuyan, ZHU Congmou, WANG Hua, et al. Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality in Zhejiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23):239 - 245. (in Chinese)
[14] 赵丹, 赵华甫, 饶杰, 等. 基于趋势面的耕地质量空间分异特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 219 - 223.
ZHAO Dan, ZHAO Huafu, RAO Jie, et al. Analysis of the spatial distribution pattern of cultivated land quality and the influential factors based on trend-surface[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 219 - 223. (in Chinese)
[15] 王倩,尚月敏,冯锐,等. 基于变异函数的耕地质量等别监测点布设分析:以四川省中江县和北京市大兴区为例[J]. 中国土地科学,2012(8):80 - 86.
WANG Qian, SHANG Yuemin, FENG Rui, et al. Study on location sampling for monitoring the quality of arable land based on variation functions: case studies in Zhongjiang City and Daxing District[J]. China Land Sciences, 2012(8):80 - 86. (in Chinese)
[16] 李高行. 基于地统计学的耕地质量时空变化研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
LI Gaoxing. Study on the spatio-temporal change of the quality of arable land based on geostatistics[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
[17] 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)
[18] 易玲,张增祥,汪潇,等. 近 30 年中国主要耕地后备资源的时空变化[J]. 农业工程学报,2013,29(6):1 - 12.
YI Ling, ZHANG Zengxiang, WANG Xiao, et al. Spatial-temporal change of major reserve resources of cultivated land in China in recent 30 years[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 1 - 12. (in Chinese)
[19] 卫新东,王筛妮,员学锋,等. 陕西省耕地质量时空变化特征及其分异规律[J]. 农业工程学报,2018,34(3):240 - 248.
WEI Xindong, WANG Shaini, YUAN Xuefeng, et al. Spatial and temporal changes and its variation of cultivated land quality in Shaanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 240 - 248. (in Chinese)
[20] 向梦杰, 胡晓亮. 溧阳市耕地质量空间分布特征与保护分区研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 18 - 25.
XIANG Mengjie, HU Xiaoliang. Spatial distribution and protection zoning of cultivated land in Liyang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 18 - 25. (in Chinese)
[21] 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)
[22] 罗瑶, 彭文甫, 董永波,等. 基于地理探测器下的川西高原地表温度空间格局及影响因子分析:以西昌市为例[J]. 干旱区地理,2020,43(3):738 - 749.
LUO Yao, PENG Wenpu, DONG Yongbo, et al. Geographical exploration of the spatial pattern of the surface temperature and its influencing factors in western Sichuan Plateau: a case of Xichang City[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3):738 - 749. (in Chinese)

(下转第 289 页)