

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.016

基于分类主成分分析的耕地质量空间异质性分层方法

张博强¹ 刘昌华¹ 杨茂伟² 董士伟^{3,4} 刘玉^{3,4} 卢闯^{3,4}

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454150; 2. 山东省地矿工程勘察院, 济南 250014;

3. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097; 4. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 空间分层是耕地质量监测与评价的关键环节。以科尔沁左翼中旗为例, 本文提出了一种基于分类主成分分析的耕地质量空间异质性分层方法。采用分类主成分分析量化耕地质量指标权重, 结合均值-标准差分级法划分指标为重要指标和一般指标。依据国家标准选择分等定级方法进行重要指标等级划分, 基于二阶聚类方法进行一般指标空间聚类分层, 构建分层融合规则进行耕地质量空间异质性分层。分别采用地理探测器和一致性检验方法对分层结果进行定量和定性评估, 并与全指标聚类分层方法进行对比分析。结果表明: 科尔沁左翼中旗耕地质量指标划分为重要指标和一般指标, 耕地质量空间异质性分层结果为高等、中高等、中等、中低等和低等, 相应分层面积占比分别为 12%、22%、28%、24% 和 14%; 基于地理探测器计算的分层结果 q 值为 0.74 和 0.67, 分层结果与耕地质量评价数据和耕地质量等级相契合, 空间异质性分层效果优于全指标聚类分层方法。提出的耕地质量空间异质性分层方法更加凸显重要指标对耕地质量的贡献, 可为耕地质量快速筛查和动态监测提供技术支撑。

关键词: 空间分层; 耕地质量; 分类主成分; 权重; 聚类分析; 地理探测器

中图分类号: F323.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)06-0176-11

OSID:



Spatial Heterogeneity Stratification Method of Cropland Quality Based on Categorical Principal Component Analysis

ZHANG Boqiang¹ LIU Changhua¹ YANG Maowei² DONG Shiwei^{3,4} LIU Yu^{3,4} LU Chuang^{3,4}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454150, China

2. Shandong Provincial Geo-Mineral Engineering Exploration Institute, Jinan 250014, China

3. Research Center of Information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

4. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Spatial stratification is a key link in the monitoring and evaluation of cropland quality. Taking Horqin Left-Wing Middle Banner as an example, a method for spatial heterogeneity stratification in arable cropland quality was proposed based on categorical principal component analysis. The weights of cropland quality indicators were quantified by categorical principal component analysis method, and the indicators were classified into important and general indicators by combining the mean-standard deviation grading method. The important indicators were classified by using a classification and gradation method according to the corresponding national standard, and the spatial clustering stratification of the general indicators were carried out based on the two-step clustering method. The spatial heterogeneity stratification of cropland quality was achieved by constructing the stratification and fusion rules. The stratification results were evaluated in both quantitative and qualitative terms by using geographical detector and consistency testing method, respectively, and were compared with the full-indicator clustering stratification method. The results showed that the indicators of cropland quality in Horqin Left-Wing Middle Banner were divided into important indicators and general indicators, and the results of spatial heterogeneity stratification for cropland quality were high, medium-high, medium, medium-low, and low strata, and the corresponding proportions of stratified areas were 12%, 22%, 28%, 24% and 14%, respectively. The q values of the stratification results calculated using the geographic detector were 0.74 and 0.67, and

收稿日期: 2025-07-19 修回日期: 2025-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500203)和国家自然科学基金项目(32201442)

作者简介: 张博强(1998—),男,研究实习员,主要从事耕地数据空间分析研究, E-mail: 1439446236@qq.com

通信作者: 董士伟(1984—),男,正高级工程师,主要从事时空数据分析研究, E-mail: dshiwei2006@163.com

the stratification results were consistent with the evaluation data of cropland quality and the grades of cropland quality. The effect of spatial heterogeneity stratification was better than that of the full-indicator clustering stratification method. The developed spatial heterogeneity stratification method of cropland quality can highlight the contributions of important indicators to cropland quality, and provide a technical support for rapid screening and dynamic monitoring of cropland quality. The developed method for spatial heterogeneity stratification in arable cropland quality further highlighted the contribution of key indicators to soil fertility, thereby providing technical support for rapid screening and dynamic monitoring of arable cropland quality.

Key words: spatial stratification; cropland quality; categorical principal component; weight; cluster analysis; geographical detector

0 引言

耕地质量监测是进行耕地保护与利用的基础,可以及时掌握耕地质量变化趋势,为耕地质量评价提供动态数据支撑^[1],对于指导农业生产、保护耕地资源具有重要作用^[2-3]。布设耕地质量监测点,可以获取耕地质量基础数据,但由于人力物力限制,无法对区域内每个耕地图斑进行监测,因此监测点空间分布将影响耕地质量监测准确性^[4-5]。耕地质量在空间分布上具有异质性^[6],即空间分布上的不均匀性和复杂性^[7],随机布设监测点,可能会导致监测点未能有效覆盖异质性区域,监测数据也无法全面、准确地反映整个研究区的耕地质量状况。因此,耦合耕地质量与空间属性的空间分层十分必要^[8],空间分层能根据耕地质量异质性,将研究区划分为不同层次或区域,基于每个分层的特征,可以针对性地布设监测点,确保耕地质量监测的科学性和有效性^[9-10]。

现有研究中,将土地利用现状^[11]、区块单元^[12]和行政区划^[13]直接作为空间分层基本单元,实现监测点特征空间优化,这类方法简单易行,分层数据易获取,但无法全面准确反映监测对象内部复杂的变异特征,不适用于变异程度较大的监测区域。基于空间自相关分析^[14-15]和空间聚类分析^[16]的分层抽样方法,主要通过分析数据间的相似性将其划分为若干类,使类内差异最小化、类间差异最大化,从而进一步确定每一类的边界。但这类方法无法实现空间分层结果中各区域的完整性与连续性,还需根据区域的整体性原则对分层结果进一步调整。此外,也有研究基于先验知识、环境因子、辅助数据、历史数据等获取监测目标空间分层^[17-18]。以上方法虽减少了样点数量并提高了监测精度,但在实际分层时,未能考虑影响耕地质量的指标权重。目前耕地质量指标权重计算方法主要分为主观赋权法(如特尔菲法^[19]、层次分析法^[20])、客观赋权法(如熵权法^[21]、主成

分分析法^[22])以及主客观结合的组合赋权法。主观赋权法依赖专家经验,解释性强但易受人为因素影响;客观赋权法基于数据变异特征,数学严谨但可能偏离实际意义;组合赋权法综合二者优势,但计算复杂度较高。影响耕地质量指标在数据上的空间差异性不同,可能导致对耕地质量影响较大的指标未能起到主要作用,影响较小的指标却占据主导位置,降低了空间分层结果的科学性和代表性。

因此,本研究考虑影响耕地质量的指标权重,提出一种基于分类主成分分析的耕地质量空间异质性分层方法,通过分类主成分分析计算各个指标权重并划分指标类型,进行耕地质量空间异质性分层,并对空间分层结果进行合理性评估,旨在更好地认识和理解不同指标对空间分层的贡献,支撑耕地质量的快速筛查和动态监测。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区科尔沁左翼中旗地处内蒙古自治区通辽市东北部,位于东经 121°08' ~ 123°32',北纬 43°32' ~ 44°32',如图 1 所示。科尔沁左翼中旗属于中温带大陆性季风气候区,干燥多风沙,气温日较差和年较差大。地势由西北向东南倾斜,以平原地貌为主,土地总面积 9 811 km²。土地辽阔,耕地资源丰富,耕

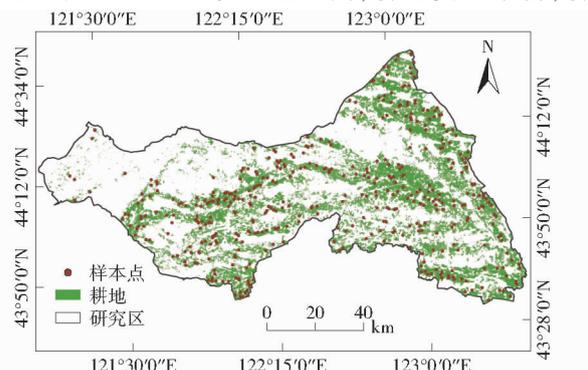


图1 研究区

Fig. 1 Study area

地质量总体处于中等偏上水平,但空间分异明显,主要受到自然因素和人类活动的共同影响。该旗是内蒙古重要的粮食生产基地,主要种植玉米,少量种植水稻、大豆等作物。

1.2 数据来源与预处理

采用2017年科尔沁左翼中旗样本点数据、耕地质量等级划分指标和耕地质量等级。

(1) 样本点数据

2017年根据耕地面积、土壤类型、前期耕地质量水平和种植制度等,选择具有代表性和典型性的区域采集433个土壤样本点,样本点分布如图1所示。原始采样中,每个样本点在 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 正方形网格4个顶点和中心点处选择 $0 \sim 20\text{ cm}$ 耕层土壤混合,按四分法选取分析样品 1.0 kg ,采样时利用GPS获取样本点地理坐标。所有土样在室内自然风干,碾压磨碎后,用于测定土壤pH值和有机质、全氮、有效磷、速效钾含量。此外,用环刀法测定土壤容重。样本点数据用于构建部分耕地质量等级划分指标。

(2) 耕地质量等级划分指标

上述土壤6项指标经测定获取;有效土层厚度、耕层质地、障碍因素、灌溉能力、排水能力、农田林网化程度来源于通辽市耕地质量等级评价数据库;基于地理数据云平台下载的数字高程模型提取坡度。各项指标经数据完整性检查后未存在缺失值;根据国家标准计算类别型变量的隶属度,基于Z-score标准化方法对所有指标进行标准化处理,以消除量纲影响。耕地质量等级划分指标主要用于进行耕地质量空间异质性分层。

(3) 耕地质量等级

来源于通辽市耕地质量等级评价数据库的数据以土地利用现状图、土壤图叠加形成的图斑作为评价单元,计算得到耕地质量综合指数赋值评价单元,获取最终的耕地质量等级数据。耕地质量综合指数越大,耕地质量水平越高;一等地耕地质量最高,十等地耕地质量最低。2017年科尔沁左翼中旗耕地质量等级数据用于评估耕地质量空间异质性分层结果。

2 研究方法

技术路线如图2所示,主要包括数据源与数据预处理、耕地质量空间异质性分层、分层结果合理性评估。首先,选取耕地质量等级划分指标,基于分类主成分分析方法计算指标权重,根据各指标权重划分为重要指标和一般指标;其次,重要指标和一般指标分别进行空间分层,构建异质性空间分层规则进

行融合,进而获取耕地质量空间异质性分层结果;最后,从定量和定性2个角度评估空间分层结果合理性,并与全指标聚类分层结果进行对比分析,用于评估耕地质量空间异质性分层方法效果。

2.1 指标权重计算与划分方法

2.1.1 分类主成分分析

主成分分析可以通过降维减少数据集中的变量数量,保留数据中的主要变异性^[23]。创建的主成分是原始变量的线性组合,按照方差排序,以捕捉数据集中的最大信息。作为一种数据驱动的客观赋权法,主成分分析通过方差贡献率加权综合指标在各主成分上的载荷来确定权重,有效消除了评价指标间多重相关性的干扰,避免了主观偏差,并降维突出核心信息^[24],应用在土地资源评价、水资源风险评估等领域^[22,25]。分类主成分分析(Categorical principal components analysis, CATPCA)运用最优尺度变化将分类标签转换为数值,并保证量化转换为变量的方差最大,进一步将量化数据用于对数据整体降维^[26]。主成分分析是无监督降维方法,通过最大化全局方差提取数据主成分,适用于探索整体结构;CATPCA是有监督降维方法,依赖类别标签计算类间方差,生成最大化类别区分度的判别成分^[27]。二者均需数值型输入特征,但CATPCA的核心差异在于利用标签指导投影方向,专门优化分类任务的分离性。考虑到耕地质量等级划分指标中还包含障碍因素(无障碍、沙化耕地型、钙积层、氯化物、碳酸物)、灌溉能力(充分满足、基本满足、不满足)、农田林网化程度(高、中、低)等指标,因此选择分类主成分分析方法计算耕地质量指标权重,用于反映指标重要性。

原始数据集标准化处理后进行分类主成分分析,设置主成分数量 m (一般取特征值大于1)和各变量类型,获取主成分结果并记录其特征值、成分载荷、方差贡献率;根据特征值和成分载荷计算线性组合系数 X_{ij} ,计算式为

$$X_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\lambda_j}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中 r_{ij} ——第 i 指标第 j 个主成分载荷数

λ_j ——第 j 个主成分特征值

n ——指标数量

计算综合得分系数 l_i ,计算式为

$$l_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_j X_{ij}}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (2)$$

式中 v_j ——第 j 个主成分方差贡献率

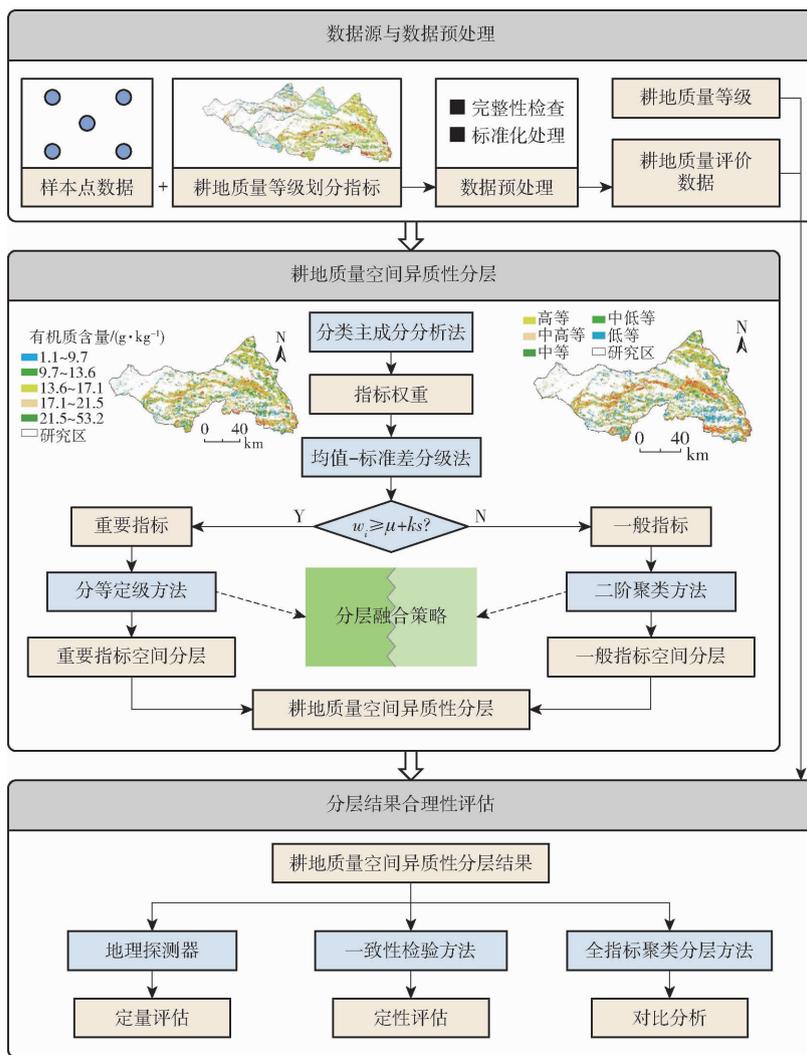


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

将综合得分系数进行归一化处理,获取各指标权重 w_i ,计算式为

$$w_i = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (3)$$

2.1.2 均值-标准差分级法

均值-标准差分级法是一种基于数据统计特性划分连续变量等级的方法,其原理核心是利用标准差衡量数据点偏离平均值的“距离”定义区间边界^[28]。标准差反映各指标权重相对于平均权重的偏离程度,均值和标准差能反映不同指标的重要程度,权重高于平均权重的指标更为重要。利用均值-标准差分级法获取耕地质量指标权重均值和不同标准差倍数组,通过调整标准差倍数(k 值)设定阈值,以此筛选出重要指标和一般指标。

均值-标准差分级法计算步骤为:计算指标权重均值(μ)和标准差(s),设定动态阈值 $\mu + ks$, k 为可调整的正整数系数, k 值越大则筛选标准越严格,将权重大于阈值的指标设为重要指标,其余为一般指标。

2.2 空间异质性分层方法

2.2.1 重要指标分层方法

重要指标依据国家、行业或地方标准进行等级划分。考虑到多个重要指标进行空间叠置分析的破碎化图斑数量,将每个重要指标等级划分结果整合为高、中、低 3 个等级,所有重要指标分层后进行空间叠置分析,依据分层融合规则分为高、中、低 3 个等级,其中重要指标分层融合规则为:高等(所有指标中等及以上且包含高等)、低等(所有指标中等及以下且包含低等)、中等(其他情况)。

2.2.2 一般指标分层方法

一般指标基于二阶聚类方法进行空间聚类分层。二阶聚类可以处理连续变量和分类变量^[29],适用于大型数据集,并且对异常值有较好的稳健性。二阶聚类的分析过程分为预聚类和正式聚类。对于数据集中的每个样本,根据其变量值构建聚类特征树,叶子节点(树的最底层节点)中的样本集合形成初步子聚类;基于贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)将预聚类形成的子聚类进

行合并获取最终聚类结果。BIC 是在模型复杂性与模型对数据集的描述能力之间寻求最佳平衡,用于确定最优聚类数目和初始聚类中心^[30]。确定聚类数目后,统计分析每个聚类结果对应的耕地质量综合指数平均值,按照数值大小将聚类结果划分相应等级。例如,最优聚类数目为3类,按照耕地质量综合指数平均值将聚类结果划分为高、中、低3个等级。

2.2.3 分层融合规则和方法

重要指标和一般指标分层分别揭示了耕地质量在不同维度上的空间分异规律,二者具有相对独立性且互为补充。重要指标和一般指标分层结果进行空间叠置分析,获取不同等级组合;综合考虑分层数量并确保层内相似和层间差异,构建分层融合规则,将相近的原始等级组合合并为数量更少的融合等级;融合等级数量可根据研究目标灵活调整,并可进行层级压缩(如将相邻等级合并)。例如,空间叠置分析后获取9种不同等级组合:高-高、高-中、中-高、高-低、中-中、低-高、中-低、低-中、低-低。将9种不同等级组合融合为5等:高等(高-高)、中高等(中-高、高-中)、中等(中-中、高-低、低-高)、中低等(中-低、低-中)、低等(低-低);这5等也可以根据研究目标再次融合成3等,其中高等和中高等合并、中低等和低等合并。

2.3 分层结果合理性评估方法

耕地质量等级或耕地质量评价数据作为参考数据,从定性和定量2个角度评估空间分层结果合理性。定性评估主要是分析各个分层内耕地质量的空间特征,定量评估主要是基于地理探测器的 q 值度量因变量在空间异质性分层的分异性。

地理探测器是一种用于探测和利用空间分异性的统计学方法,能够揭示地理现象背后的原因和驱动力^[31]。地理探测器中的因子探测器使用 q 值探测因变量的空间分异性,评估自变量对因变量分异性的解释程度。若某个自变量是导致因变量空间分异的决定性因素,则自变量划分的各个层内,因变量的方差应尽可能小(层内相似);而不同层之间的均值差异应尽可能大(层间差异)。 q 值域为 $[0, 1]$, q 值越大,表明空间分层分异性越高,空间分层效果越好^[7,32]。 q 值基于相应 p 值进行显著性检验, p 值表征显著统计水平, p 值越小表明结果越显著^[31]。

3 结果与分析

3.1 权重计算与指标划分

依据《耕地质量等级》^[20],基于科尔沁左翼中旗

耕地利用现状,同时考虑数据的可获取性,选取农田林网化程度、坡度、有效土层厚度、耕层质地、障碍因素、土壤容重、pH值、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量、灌溉能力和排水能力13个指标反映科尔沁左翼中旗耕地质量水平^[33-34]。

使用SPSS Statistics 27软件对标准化后的指标进行分类主成分分析,获取各个主成分特征值、成分载荷和方差贡献率。根据式(3)计算出各指标权重(表1),有机质含量和全氮含量权重较高,分别为0.106和0.105,表明有机质含量和全氮含量对于耕地质量的影响较大;土壤容重和农田林网化程度权重较小,分别为0.043和0.048,对耕地质量影响相对较小。

表1 指标权重与类型划分

指标	权重	类型划分
有机质含量	0.106	重要指标
全氮含量	0.105	
速效钾含量	0.096	一般指标
耕层质地	0.087	
障碍因素	0.087	
有效土层厚度	0.077	
pH值	0.077	
排水能力	0.072	
灌溉能力	0.072	
坡度	0.066	
有效磷含量	0.064	
农田林网化程度	0.048	
土壤容重	0.043	

根据表1,利用均值-标准差分级法划分指标类型。计算指标权重均值和标准差,分别为0.0769和0.0194。通过调整 k 值探索合理的划分阈值:当 $k=1$ 时,阈值为0.0963,有机质含量和全氮含量权重超过该阈值;而当 $k \geq 2$ 时,阈值大于等于0.1157,所有指标权重均未超过阈值。因此选取 $k=1$,将大于阈值的有机质含量和全氮含量作为重要指标,其余指标为一般指标(表1)。有机质含量和全氮含量反映耕地的养分状况,作为耕地质量监测的重要指标也符合专业领域认知。

3.2 耕地质量空间异质性分层

3.2.1 重要指标分层

参照文献[35],结合科尔沁左翼中旗耕地状况,设定耕地质量重要指标有机质含量与全氮含量分级标准:有机质含量分层为高等(> 20 g/kg)、中等(10~20 g/kg)和低等(0~10 g/kg);全氮含量分层为高等(> 1 g/kg)、中等(0.75~1 g/kg)和低等(0~0.75 g/kg)。有机质含量分层和全氮含量分层

进行空间叠置分析,并按照重要指标分层融合规则,将重要指标划分为高等、中等和低等,如图 3 所示。由图 3 可知,高等耕地(面积占比 33%)集中分布于研究区中部、东北部及东南部,呈现分散条带状分布;中等耕地(占比 40%)以东北部分布为主,西南部零散分布;低等耕地(占比 27%)主要分布在研究区东南部和西南部。

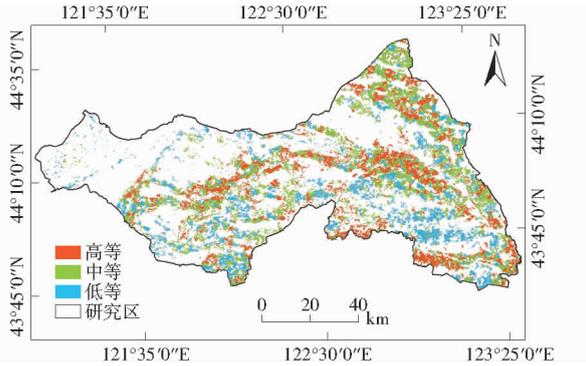


图 3 重要指标分层

Fig. 3 Stratification of important indicators

3.2.2 一般指标分层

一般指标包括农田林网化程度、坡度、有效土层厚度、耕层质地、障碍因素、土壤容重、pH 值、有效磷含量、速效钾含量、灌溉能力和排水能力,基于二阶聚类获取一般指标的聚类结果,计算不同聚类数目对应的 BIC 值,如图 4 所示。随着聚类数目增加,BIC 值整体呈下降趋势,但下降速率在聚类数目为 3 处变化显著,出现拐点:聚类数目从 1 到 3 时 BIC 值分别下降 20.9% 和 16.4%,超过 3 后 BIC 值下降减缓且均不超过 10%,因此选择曲线拐点对应的 3 类作为一般指标分层的最优聚类数目。

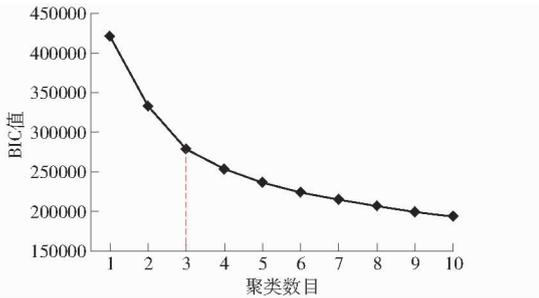


图 4 不同聚类数目的 BIC 值

Fig. 4 BIC values of different cluster numbers

统计分析 3 个聚类结果对应的耕地质量综合指数平均值(0.744、0.666、0.585),按照数值大小将聚类结果划分为高等、中等和低等分层(图 5)。由图 5 可知,高等耕地在空间上呈现中部-东南部分散条带状分布,面积占比 26%;中等耕地在东北部连片和西部散点分布,面积占比 38%;低等耕地在西北部 and 东南部边缘地带、研究区中部分布,面积占比 36%。

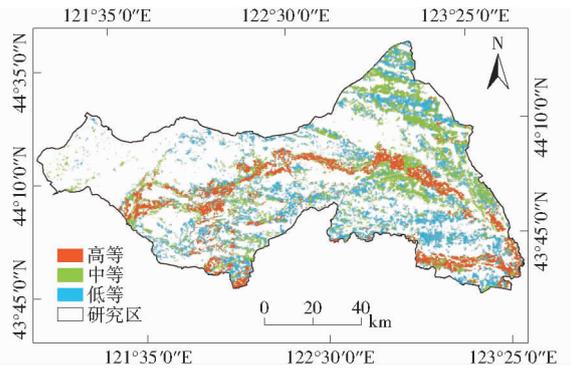


图 5 一般指标分层

Fig. 5 Stratification of general indicators

3.2.3 空间分层融合

重要指标分层结果(图 3)和一般指标分层结果(图 5)进行空间叠置分析,获取 9 种不同等级组合。基于构建的分层融合规则,将 9 种不同等级组合融合为 5 等:高等、中高等、中等、中低等和低等,如图 6 所示。耕地质量高等、中高等、中等、中低等和低等分层面积占比分别为 12%、22%、28%、24%、14%。由于耕地质量存在显著的空间异质性,5 个等级的分层在区域内零散交错分布,刻画了耕地质量内部间的差异性。

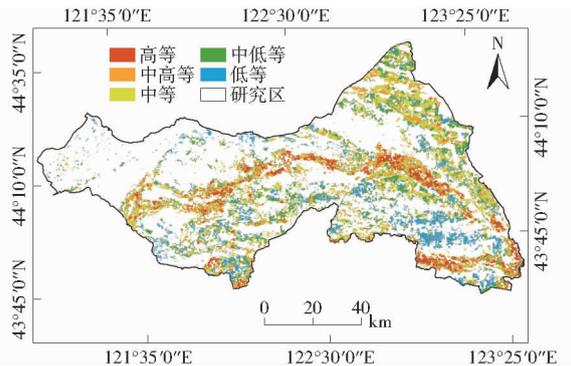


图 6 耕地质量空间异质性分层

Fig. 6 Spatial heterogeneity stratification of cropland quality

3.3 空间异质性分层结果合理性评估

3.3.1 空间异质性分层结果定量分析

利用耕地质量等级和耕地质量评价数据作为参考,基于地理探测器的 q 值定量探测耕地质量空间异质性分层的分异性。由于本研究无法获取研究区质地构型、清洁程度等指标,故补充了耕地质量评价数据作为参考数据。耕地质量评价数据基于本研究采用的 13 个指标,参考《耕地质量等级》进行耕地质量评价,获取一等~十等评价等级。考虑到本研究 5 个分层等级,对 10 个耕地质量评价等级按照顺序进行两两合并处理,最终得到 5 个耕地质量评价等级,分别命名为一等~五等,一等地耕地质量最高,五等地耕地质量最低。

分别选择耕地质量等级和耕地质量评价数据,

基于地理探测器对耕地质量空间异质性分层结果进行计算, q 值分别为 0.67 和 0.74 ($p < 0.001$)。结果表明耕地质量空间异质性分层结果具有明显的异质性, 分层效果好。此外, 由于采用耕地质量等级, 在数据制作过程中选取的指标体系多于本研究的 13 个指标, 计算的 q 值比耕地质量评价数据计算的 q 值减少 0.07, 但不同数据源的评价结果均证明了本文耕地质量空间异质性分层的合理性。

3.3.2 空间异质性分层结果定性分析

分层合理性定性评估主要是分析各个分层内耕地质量的空间特征, 分别绘制科尔沁左翼中旗的耕地质量评价数据和耕地质量等级与耕地质量空间异质性分层结果的堆积条形图, 如图 7 所示。

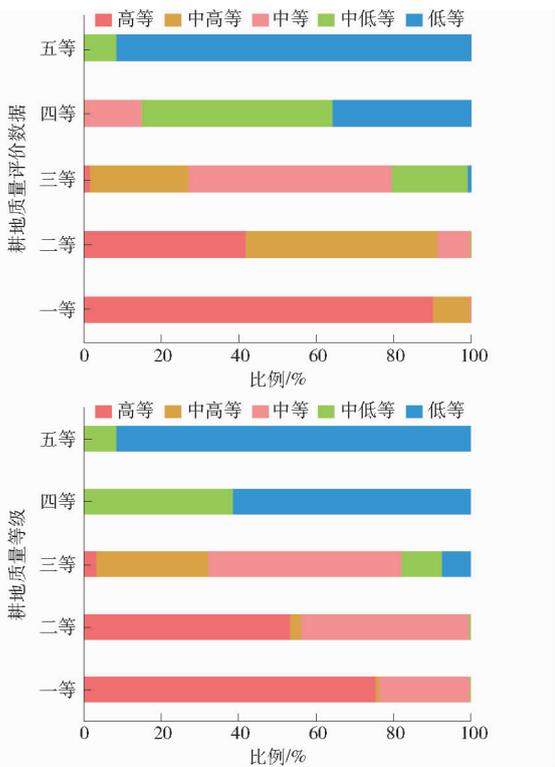


图 7 参考数据分层统计

Fig. 7 Reference data stratified statistics

空间异质性分层的高等耕地在耕地质量评价数据和耕地质量等级中均主要分布在一等; 中高等耕地在耕地质量评价数据中主要分布在二等, 在耕地质量等级中主要分布在二、三等; 中等耕地在耕地质量评价数据和耕地质量等级中均主要分布在三等; 中低等耕地在耕地质量评价数据和耕地质量等级中均主要分布在四等; 低等耕地在耕地质量评价数据和耕地质量等级中均主要分布在五等。整体上, 耕地质量空间异质性分层结果与耕地质量评价数据和耕地质量等级的分布趋势均呈现较高的一致性。耕地质量空间异质性分层方法能准确地反映不同区域耕地质量差异, 与耕地质量评价数据和耕地质量等

级相契合, 空间异质性分层效果较好。

3.3.3 空间异质性分层与全指标聚类分层对比

对比耕地质量空间异质性分层与全指标聚类分层, 其中全指标聚类分层是基于所有指标直接进行二阶聚类, 聚类数设置为 5 类, 与空间异质性分层方法保持一致。统计分析 5 个聚类结果对应的耕地质量综合指数平均值, 按照数值大小将聚类结果划分为 5 等: 高等、中高等、中等、中低等和低等, 如图 8 所示。

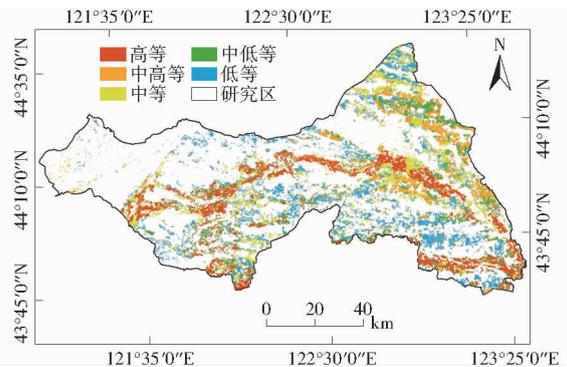


图 8 全指标聚类分层

Fig. 8 Cluster stratification of all indicators

选择耕地质量空间异质性分层结果、全指标聚类分层结果分别与耕地质量评价数据和耕地质量等级进行空间叠置分析, 获取一致和不一致结果的空间分布, 如图 9 所示。从整体上分析, 耕地质量空间异质性分层结果与耕地质量评价数据和耕地质量等级一致性更高 (图 9a、9c), 全指标聚类分层结果与耕地质量评价数据和耕地质量等级存在明显差异 (图 9b、9d)。

分别统计 2 种分层结果的各等级图斑面积与耕地质量评价数据和耕地质量等级相应等级的一致性面积比例, 如表 2 所示。耕地质量空间异质性分层在中高等、中等、中低等与耕地质量评价数据的一致性分别为 46%、54%、47%, 比全指标聚类分层分别提高 39、17、23 个百分点; 在中高等、中等、中低等与耕地质量等级一致性优于全指标聚类分层, 但在高等和低等的一致性较差。总体上, 耕地质量空间异质性分层与耕地质量评价数据、耕地质量等级的总体一致性分别为 52% 和 55%, 比全指标聚类分层分别提高 23、10 个百分点。表明耕地质量空间异质性分层方法更准确有效。

选择耕地质量评价数据和耕地质量等级为参考, 对全指标聚类分层结果进行定量与定性分析, 基于地理探测器计算全指标聚类分层的 q 值分别为 0.63 和 0.65 ($p < 0.001$), 比空间异质性分层的 q 值相应下降 11% 和 2%。2 种方法参考耕地质量等级计算结果差异不大, 仅绘制科尔沁左翼中旗耕地质

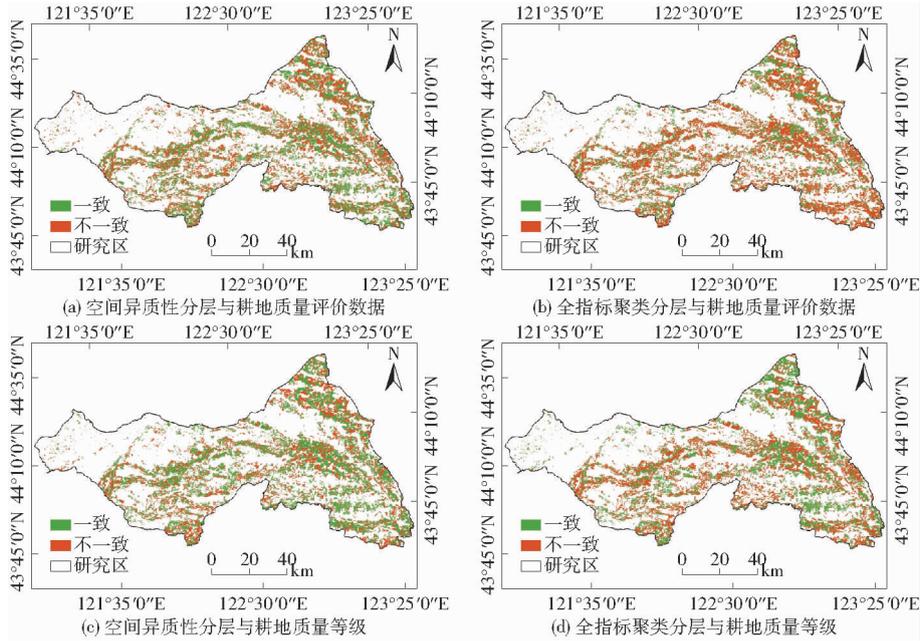


图 9 分层结果与评价数据一致性对比

Fig. 9 Comparison of consistency between stratification results and evaluation data

表 2 分层结果与评价数据一致性面积比例

Tab. 2 Proportion of consistency area between stratification results and evaluation data %

评价数据	等级	分层方法	
		空间异质性分层	全指标聚类分层
耕地质量评价数据	一等/高等	90	90
	二等/中高等	46	7
	三等/中等	54	37
	四等/中低等	47	24
	五等/低等	92	96
	总体	52	29
耕地质量等级	一等/高等	63	80
	二等/中高等	49	3
	三等/中等	53	44
	四等/中低等	49	43
	五等/低等	76	91
	总体	55	45

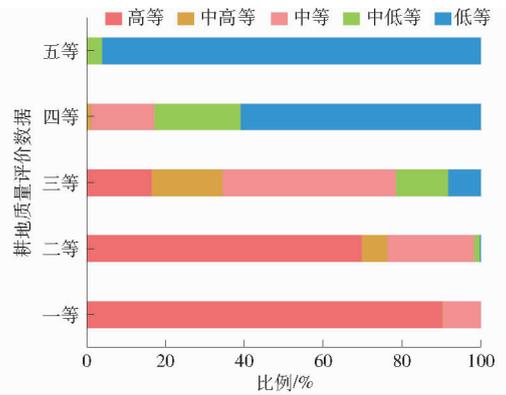


图 10 耕地质量评价数据全指标聚类分层统计

Fig. 10 All indicators cluster stratification statistics for cropland quality evaluation data

表 3 不同方法耕地质量各等级分布比例

Tab. 3 Grade distribution proportion of cropland quality for different methods %

方法	等级	耕地质量评价数据				
		一等	二等	三等	四等	五等
空间异质性分层	高等	91	42	2		
	中高等	9	50	25		
	中等		8	53	15	
	中低等			20	49	9
	低等				36	91
全指标聚类分层	高等	90	70	17		
	中高等		7	18	1	
	中等	10	22	44	16	
	中低等		1	13	22	4
	低等			8	61	96

量评价数据与全指标聚类分层结果的堆积条形图进行分析,如图 10 所示。

分别计算耕地质量评价数据在空间异质性分层和全指标聚类分层各等级中的分布比例,如表 3 所示。耕地质量评价数据的一等、五等与空间异质性分层和全指标聚类分层的高等、低等均具有很好的 consistency;耕地质量评价数据的二等主要对应空间异质性分层的中等,但全指标聚类分层的中等占比太小,仅有 7%,主要分布在高等;耕地质量评价数据的三等、四等与空间异质性分层的中等、中低等一致性也优于全指标聚类分层。综上所述,本研究的空间异质性分层结果与耕地质量评价数据更为

一致,空间异质性分层效果优于全指标聚类分层方法。

4 讨论

4.1 耕地质量空间异质性分层优势

耕地质量等级划分是从农业生产角度出发,通过综合指数法对耕地地力、土壤健康状况和田间基础设施构成的满足农产品持续产出和质量安全能力进行评价划分的等级,已构建出科学的分类框架和完善的评价体系。但耕地质量在空间分布上具有异质性,易导致布设的监测点区域代表性不强,因此进行耕地质量空间分层非常关键,可以确保耕地质量监测的科学性和有效性。本文耕地质量空间异质性分层方法通过分类主成分分析计算指标权重系数进而划分重要指标和一般指标,对重要指标和一般指标分别进行分层后按照分层融合规则进行空间异质性分层,更加凸显了重要指标对于耕地质量的贡献,减少了一般指标对耕地质量的干扰。在此分层结果上有针对性地布设监测点,可以提高耕地质量监测精度和效率。基于平均最短距离最小化准则和空间模拟退火算法,在科尔沁左翼中旗耕地质量空间异质性分层基础上采用分层均匀抽样布设监测点,并与空间均匀抽样和格网抽样方法进行对比,用于评估空间分层对抽样的作用效果。选择特征空间评价指标——偏离指数^[36],计算分层均匀抽样结果的偏离指数为0.04,优于空间均匀抽样方法(0.10)和格网抽样方法(0.12),表明空间异质性分层可以优化耕地质量监测点的空间布设。

此外,耕地质量空间异质性分层数量还可以根据研究目标灵活调整,并可进行层级压缩(如将相邻等级合并)。例如,基于提出的分层融合规则,5等分层结果再次融合成3等:高等和中高等合并、中低等和低等合并,以便与重要指标分层结果进行分析比较。对比分析耕地质量空间异质性分层和重要指标分层结果,重要指标分层的高等有75%分布在空间异质性分层中的高等和中高等耕地,25%分布在中等耕地;中等耕地有24%分布在空间异质性分层中的中高等耕地,41%分布在中等耕地,35%分布在中低等耕地;低等耕地有86%分布在空间异质性分层中的低等和中低等耕地,仅有14%分布在中等耕地。重要指标分层结果与耕地质量空间异质性分层结果有很强相似性,在一定程度上反映出耕地质量状况,能用来快速筛查区域耕地质量。

4.2 研究方法适用性

耕地质量空间异质性分层方法通过融合多源指标,制定不同类型指标的分层融合策略,基于空间叠置分析与等级组合优化规则,实现对耕地质量空间分异规律的系统化解析,可为区域耕地质量快速筛

查和动态监测提供技术支撑。选择黑龙江省建三江垦区的11个农场(创业农场、大兴农场、二道河农场、洪河农场、浓江农场、七星农场、前锋农场、前进农场、前哨农场、青龙山农场、鸭绿河农场)进行耕地质量空间异质性分层方法的适用性验证,先后开展权重计算与指标划分、空间异质性分层和分层结果合理性评估,验证结果表明:基于地理探测器对11个农场耕地质量空间异质性分层结果计算的 q 值为0.48,分层结果与耕地质量评价数据一致性高,空间异质性分层效果优于全指标聚类分层方法,如图11所示。此外,进行与科尔沁左翼中旗相同的分层抽样对比,抽样结果表明分层均匀抽样结果的偏离指数为0.02,优于空间均匀抽样方法(0.04)和格网抽样方法(0.06),空间分层优化耕地质量监测点空间布设效果明显。由于科尔沁左翼中旗和建三江垦区在气候条件(半干旱、湿润)、土壤本底(瘠薄风沙土、肥沃黑土)及空间格局(异质破碎、均质连片)等方面存在显著异质性。因此,提出的耕地质量空间异质性分层方法在不同异质区域具有良好适用性。

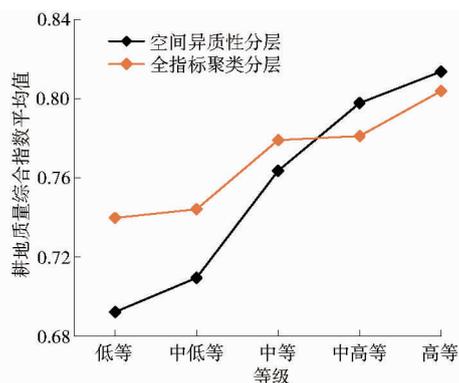


图11 不同方法在11个农场分层结果统计对比

Fig. 11 Statistical comparison of stratification results for different methods in 11 farms

4.3 不确定性分析

(1)耕地质量指标选取和参考数据不确定性。由于部分指标数据获取的限制,本研究耕地质量指标和用于评估的耕地质量评价数据无法完全覆盖《耕地质量等级》的指标体系,可能会增加研究结果的不确定性,未来计划多途径获取或估算缺失指标,以提高研究结果的可靠性。

(2)分类主成分分析方法具有一定局限性,主要包括对异常值敏感、忽略变量间层级结构、高维稀疏数据表现不稳定等。CATPCA对异常值敏感,异常类别频次会扭曲量化评分,导致主成分方向偏移^[37];无法保留具有层次关系的分类变量(如土壤类型-亚类-土属)的层级约束,可能丢失关键结构信息;当分类变量类别数过多或样本量不足时,量化

矩阵易出现奇异性,导致主成分载荷估计误差增大^[27]。本研究针对性地对各项指标进行了数据完整性检查和标准化处理,降低了分类主成分分析对研究结果不确定性的影响,未来研究应嵌入层级约束算法和稀疏回归技术,进一步提升复杂分类数据的解释力与稳定性。

(3)重要指标和一般指标的划分标准和融合规则也存在一定不确定性:①数学模型计算结果与领域专业知识之间易出现偏差,例如易变指标全氮含量在本研究区内呈现强烈空间分异,计算获得较高权重被划分为重要指标,也满足空间分层后的监测点布设需求;而某些机理上稳定的核心指标(如有效土层厚度)因研究区内分布相对均质而导致其统计权重被低估,未来需耦合数学模型和领域知识进行指标权重优化。②重要指标和一般指标划分可能高度依赖于数据特征,不同数据源或区域背景可能导致划分结果出现显著差异,未来应综合考虑在不同区域采用不同数据源进一步验证,提升该方法在不同情景下的普适性和稳健性。③构建的分层融合规则是一种基于等级组合逻辑判断的简化模型,未能完全刻画不同等级组合的深层含义,应探索研究

更精细化的分层融合策略。

5 结论

(1)基于分类主成分分析计算耕地质量指标权重,利用均值-标准差分级法划分指标为重要指标和一般指标;重要指标和一般指标分别进行分层后,基于建立的分层融合规则获取了科尔沁左翼中旗耕地质量空间异质性分层结果,高等、中高等、中等、中低等和低等分层面积占比分别为12%、22%、28%、24%和14%。

(2)基于地理探测器对耕地质量空间异质性分层结果计算的 q 值为0.74和0.67,提出的耕地质量空间异质性分层方法能准确反映不同区域耕地质量差异,分层结果与耕地质量评价数据和耕地质量等级一致性高,空间异质性分层效果优于全指标聚类分层方法。

(3)基于不同类型指标的分层融合策略,提出的耕地质量空间异质性分层方法更加凸显了重要指标对于耕地质量的贡献,减少了一般指标对耕地质量的干扰,可为耕地质量快速筛查和动态监测提供支撑。

参 考 文 献

- [1] MIAO S, WANG S, HUANG C, et al. A big data grided organization and management method for cropland quality evaluation [J]. *Land*, 2023, 12(10): 1916.
- [2] 童童, 丁琪珣, 蔡天培, 等. 安徽省试点县补充耕地质量监测与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2024, 36(2): 32-37.
TONG Tong, DING Qixun, CAI Tianpei, et al. Monitoring and evaluation of supplementary cultivated land quality in pilot counties in Anhui [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2024, 36(2): 32-37. (in Chinese)
- [3] 冷志杰, 刘雪宁. 东北地区耕地生态安全质量动态评估及影响要素[J]. *生态经济*, 2024, 40(4): 122-128.
LENG Zhijie, LIU Xuening. Dynamic assessment and influencing factors of cultivated land ecological security quality in Northeast China [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(4): 122-128. (in Chinese)
- [4] 杨文浩, 刘振华, 杨颢, 等. 基于改进空间模拟退火算法的耕地质量监测点优化布设[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(2): 110-118.
YANG Wenhao, LIU Zhenhua, YANG Hao, et al. Optimal layout of cultivated land quality monitoring points based on improved spatial simulated annealing algorithm [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2): 110-118. (in Chinese)
- [5] 杨厚翔, 雷国平, 徐秋. 基于监测指标复合式控制区的耕地质量监测点布设方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 278-286.
YANG Houxiang, LEI Guoping, XU Qiu. Farmland quality monitoring point layout method based on compound control zone of monitoring index [J]. *Transactions of the CASE*, 2017, 33(19): 278-286. (in Chinese)
- [6] 熊想想, 杨朝现, 信桂新, 等. 山地丘陵区村级尺度耕地质量评价及保护分区[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 308-315.
XIONG Xiangxiang, YANG Chaoxian, XIN Guixin, et al. Evaluation and protection zoning of cultivated land quality on village scale in mountainous hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 308-315. (in Chinese)
- [7] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [8] 林建平, 黄坤, 邓爱珍, 等. 耦合耕地综合质量和空间连通性的基本农田划定研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(7): 221-231, 251.
LIN Jianping, HUANG Kun, DENG Aizhen, et al. Basic farmland demarcation coupling comprehensive quality and spatial connectivity of cultivated land [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(7): 221-231, 251. (in Chinese)
- [9] 吴亚楠, 董士伟, 肖聪, 等. 面向遥感分类精度评价的空间分层模式与分异性评估[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 147-153.
WU Ya'nan, DONG Shiwei, XIAO Cong, et al. Spatial stratification mode and differentiation evaluation for accuracy assessment

- of remote sensing classification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 147–153. (in Chinese)
- [10] DONG S, CHEN Z, GAO B, et al. Stratified even sampling method for accuracy assessment of land use/land cover classification: a case study of Beijing, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(16): 6427–6443.
- [11] 赵瑞, 吴克宁, 杨淇钧, 等. 基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 333–343. ZHAO Rui, WU Kening, YANG Qijun, et al. Farmland soil health evaluation method based on soil function and soil threat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 333–343. (in Chinese)
- [12] 刘玮晶, 刘焯, 汪子意, 等. 典型工业遗留场地土壤污染特征分析及风险评估[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 40–44. LIU Weijing, LIU Ye, WANG Ziyi, et al. Characteristics and risk assessment of soil pollution in typical legacy industrial site [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(4): 40–44. (in Chinese)
- [13] 高秉博, 王劲峰, 胡茂桂, 等. 中国陆表自然资源综合观测台站布点优化[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1911–1920. GAO Bingbo, WANG Jinfeng, HU Maogui, et al. Optimization of integrated observation station layout for terrestrial surface natural resources[J]. Resource Science, 2020, 42(10): 1911–1920. (in Chinese)
- [14] LI Y, ZHENG S, LIU H, et al. Contour farming suitability of the black soil region in northeast China and its spatial characteristics[J]. Chinese Geographical Science, 2024, 34(6): 1119–1133.
- [15] 张金懿, 郝晋珉, 王楠, 等. 山东省耕地质量空间自相关分析与耕地保护分区研究[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 757–767. ZHANG Jinyi, HAO Jinmin, WANG Nan, et al. Protection zoning of cultivated land based on spatial autocorrelation in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 757–767. (in Chinese)
- [16] 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 county area cultivated land quality monitoring samples in Huanghua City based on spatial clustering stratified sampling[J]. Resource Science, 2019, 41(2): 257–267. (in Chinese)
- [17] 周浩, 雷国平, 杨雪昕. 三江平原典型流域土地利用格局变化与空间分异研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 142–151. ZHOU Hao, LEI Guoping, YANG Xuexin. Land use change pattern and its spatial differentiation in typical basin of Sanjiang plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 142–151. (in Chinese)
- [18] 王怡蓉. 污染场地土壤修复监测点空间布局优化方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021. WANG Yirong. Research on spatial layout optimization method of soil remediation monitoring points in contaminated sites[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 孙亚芳, 王祖伟. 农村宅基地复垦耕地适宜性评价——以天津市西青区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 24–31. SUN Yafang, WANG Zuwei. Suitability evaluation of reclaimed cultivated lands in rural homestead: a case study of Xiqing District, Tianjin City, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(1): 24–31. (in Chinese)
- [20] 全国土壤质量标准化技术委员会(SAC/TC 404). 耕地质量等级: GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 匡丽花, 叶英聪, 赵小敏, 等. 基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1627–1641. KUANG Lihua, YE Yingcong, ZHAO Xiaomin, et al. Evaluation and obstacle factor diagnosis of cultivated land system security in Yingtan City based on the improved TOPSIS method[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1627–1641. (in Chinese)
- [22] 凌子燕, 刘锐. 基于主成分分析的广东省区域水资源紧缺风险评价[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2324–2328. LING Ziyang, LIU Rui. Risk assessment on regional water scarcity in Guangdong Province based on principal component analysis[J]. Resource Science, 2010, 32(12): 2324–2328. (in Chinese)
- [23] MACKIEWICZ A, RATAJCZAK W. Principal components analysis (PCA) [J]. Computers & Geosciences, 1993, 19(3): 303–342.
- [24] JOLLIFFE I T, CADIMA J. Principal component analysis: a review and recent developments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374(2016): 20150202.
- [25] 刘湘君, 乔冠宇, 郭丰浩, 等. 基于最小数据集的黄淮海旱作区耕层土壤质量评价及障碍分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 104–113. LIU Xiangjun, QIAO Guanyu, GUO Fenghao, et al. Evaluation and obstacle analysis of cultivated horizon soil quality based on MDS in the dry farming areas of Huang-Huai-Hai Region[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(12): 104–113. (in Chinese)
- [26] KAPLAN D. The sage handbook of quantitative methodology for the social sciences[M]. Thousand Oaks: Sage Publications, 2004: 49–70.
- [27] LINTING M, VAN DER KOOIJ A. Nonlinear principal components analysis with CATPCA: a tutorial [J]. Journal of Personality Assessment, 2012, 94(1): 12–25.

- [27] DOSOVITSKIY A, BEYER L, KOLESNIKOV A, et al. An image is worth 16x16 words: transformers for image recognition at scale[J]. arXiv Preprint, arXiv:2010.11929, 2020.
- [28] LIU Z, LIN Y, CAO Y, et al. Swin transformer: hierarchical vision transformer using shifted windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021: 10012 – 10022.
- [29] ZHU L, WANG X, KE Z, et al. Biformer: vision transformer with bi-level routing attention[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023: 10323 – 10333.
- [30] VASU P K A, GABRIEL J, ZHU J, et al. Fastvit: a fast hybrid vision transformer using structural reparameterization[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2023: 5785 – 5795.
- [31] 范耀冰, 吴尚蓉, 匡炜, 等. 基于无人机高光谱影像的稻谷氮含量估算研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 332 – 343, 423.
FAN Yaobing, WU Shangrong, KUANG Wei, et al. Estimation of nitrogen content in rice grains based on UAV hyperspectral imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 332 – 343, 423. (in Chinese)
- [32] TOLSTIKHIN I O, HOULSBY N, KOLESNIKOV A, et al. Mlp-mixer: an all-mlp architecture for vision[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 24261 – 24272.
- [33] DONG X, BAO J, CHEN D, et al. Cswin transformer: a general vision transformer backbone with cross-shaped windows[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022: 12124 – 12134.
- [34] DAI J, QI H, XIONG Y, et al. Deformable convolutional networks[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 764 – 773.
- [35] 张欢, 周毅, 王克俭, 等. 基于 MobileViT-PC-ASPP 和迁移学习的果树害虫识别方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 57 – 67.
ZHANG Huan, ZHOU Yi, WANG Kejian, et al. Fruit tree pest identification method based on MobileViT-PC-ASPP and transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 57 – 67. (in Chinese)
- [36] ZENG T, LI S, SONG Q, et al. Lightweight tomato real-time detection method based on improved YOLO and mobile deployment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107625.

(上接第 186 页)

- [28] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 145 – 150.
CHEN Songlin, WANG Tianxing. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 145 – 150. (in Chinese)
- [29] SHIH M Y, JHENG J W, LAI L F. A two-step method for clustering mixed categorical and numeric data[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2010, 13(1): 11 – 19.
- [30] 储岳中. 一类基于贝叶斯信息准则的 k 均值聚类算法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2010, 27(4): 409 – 412.
CHU Yuezhong. An k means clustering algorithm based on Bayesian information criterion[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2010, 27(4): 409 – 412. (in Chinese)
- [31] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107 – 127.
- [32] 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)
- [33] 张英, 冯雪珂, 任少宝, 等. 耕地质量和产能评价指标体系研究——以广西宾阳县为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1039 – 1050.
ZHANG Ying, FENG Xueke, REN Shaobao, et al. Evaluation index system of cultivated land quality and productivity: a case study of Binyang County, Guangxi[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1039 – 1050. (in Chinese)
- [34] 陈卓. 邓州市耕地质量评价与分区保护对策研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
CHEN Zhuo. Research on evaluation and zoning protection strategy of Dengzhou Country's arable land quality[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [35] 中国土壤调查办公室. 全国第二次土壤普查养分分级标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.
- [36] 唐炬彪, 朱庆伟, 董士伟, 等. 农业用地土壤重金属样本点数据精化方法——以北京市顺义区为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2288 – 2296.
TANG Guibiao, ZHU Qingwei, DONG Shiwei, et al. Data refinement method for sampling sites of agricultural soil heavy metals: a case study in Shunyi District, Beijing, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2288 – 2296. (in Chinese)
- [37] DE LEEUW J, MAIR P. Multidimensional scaling using majorization: SMACOF in R[J]. Journal of Statistical Software, 2009, 31(3): 1 – 30.