

# 基于最小数据集与 LESA 体系的县域耕地质量评价

钱凤魁, 项子璇, 王贺兴, 顾汉龙\*

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 2. 耕地立体保护与监测重点实验室, 沈阳 110161;  
3. 土壤资源高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110161)

**摘 要:** 建立科学合理的县域耕地质量评价体系对快速准确摸清耕地质量家底和建立耕地保护分区具有重要指导意义。该研究基于主成分分析法建立最小数据集精选指标, 构建土地评价与立地条件分析 (land evaluation and site assessment, LESA) 体系, 开展耕地质量综合评价, 分析耕地质量区域分布特征及差异性特征并划定耕地保护分区。结果表明: 1) 自然质量指标最小数据集由砂粒、有机质、全钾、有效磷、pH 值、综合污染指数、耕层质地、容重、阳离子交换量组成, 立地环境指标最小数据集包括排水条件、连片度、生态兼容性、河流距离、路网密度、灌溉能力、农田林网化率、耕地利用类型。2) 采用 LESA 评价模型计算耕地自然质量指数及立地环境指数, 确定 LESA 体系为  $F_{LESA}=0.5F_{LE}+0.5F_{SA}$  ( $F_{SA}$ 、 $F_{LE}$ 、 $F_{LESA}$  分别为耕地立地环境条件、自然质量条件和综合分值), 采样点综合评分为 51.517~81.838。综合比选各插值误差检验结果后采用普通克里金法进行耕地质量结果空间插值, 评价单元耕地质量综合评分为 52.148~79.624。3) 铁岭县耕地资源可划分为 5 个等级区: 1 级区划分为永久基本农田核心保护区, 占比 20.52%; 2 级区划分为耕地自然立地条件重点治理区, 占比 36.79%; 3 级区和 4 级区耕地土壤和立地条件均存在多样性的限制因素, 可划分为耕地综合整治区, 占比 36.33%; 5 级区划分为耕地生态自然保育区, 占比 6.36%。4) 经计算基于最小数据集与 LESA 相结合的评价结果有效系数为 0.615, 相对偏差系数为 0.009, 说明该体系耕地质量评价结果准确, 可信度较高。该研究成果简化了县域耕地质量评价指标体系, 量化了自然质量与立地条件协同关系, 为开展耕地质量提升和保护利用提供了理论和方法依据。

**关键词:** 耕地; 质量评价; 最小数据集; LESA 体系; 铁岭县

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210249

中图分类号: F323.211

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0239-10

钱凤魁, 项子璇, 王贺兴, 等. 基于最小数据集与 LESA 体系的县域耕地质量评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 239-248. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210249 http://www.tcsae.org

QIAN Fengkui, XIANG Zixuan, WANG Hexing, et al. Evaluating cultivated land quality in county territory using the minimum data set, land evaluation and site assessment (LESA)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 239-248. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210249 http://www.tcsae.org

## 0 引言

耕地作为民生之本, 是农业生产最重要的基础。伴随着经济社会快速发展, 城市无序扩张、投资过热、生态环境等问题陆续涌现, 耕地面临着被大规模占用、变更用途等潜在风险。特别是非农建设占用、农业产业结构调整、国土绿化等成为导致耕地数量减少以及耕地质量降低的主要动因, 因此开展耕地质量评价研究是协调经济社会发展以及保障粮食安全的关键<sup>[1-3]</sup>。目前耕地质量评价的相关研究已逐步趋于成熟, 评价方法由定性研究到定性与定量结合分析<sup>[4-6]</sup>, 评价指标体系涵盖自然条件<sup>[7-9]</sup>、立地条件<sup>[10]</sup>、环境生态条件<sup>[11]</sup>及农户行为<sup>[12-13]</sup>等诸多层面, 评价模型主要依托 RS 和 GIS 等技术软件, 建

立多元的数理统计模型, 如 LESA 模型<sup>[14-15]</sup>、PSR 模型<sup>[16]</sup>、GA-BP 神经网络<sup>[17]</sup>、Logistic 回归模型<sup>[18]</sup>等。而《农用地质量分等规程 (GB/T 28407—2012)》及《耕地质量等级 (GB/T 33469—2016)》等相关国家标准的相继出台, 改变了过去评价指标笼统、差异化较小的问题, 实现了指标的统一化、标准化, 体现耕地资源的区域差异性特征, 满足耕地开发、利用与保护的发展需求。由于耕地质量已扩展至多维属性, 影响耕地质量的构成要素复杂, 为准确认识和评价耕地质量综合属性特征, 需建立涵盖耕地自然和立地质量特征的综合评价体系, 而不同的指标体系、评价方法及空间插值精度等均可能影响最终评价结果, 因此在全面开展耕地数量、质量、生态“三位一体”保护要求下, 构建适宜的评价指标体系和选择科学的评价方法尤为重要。

19 世纪 80 年代美国土壤保持局建立了土地评价与立地条件分析 (land evaluation and site assessment, LESA) 体系, 该系统分为土地评价 (land evaluation, LE) 与立地分析 (site assessment, SA) 两部分, LE 反映耕地自然质量条件, SA 则反映耕地对立地环境的协同性。LESA 系统相对于其他方法的优势在于灵活性, 在为不同的管

收稿日期: 2022-10-31 修订日期: 2023-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目“黑土地保护与利用科技创新”重点专项黑土地耕地质量评价技术与平台子课题: 黑土地耕地质量分区分类调查评价方法 (2021YFD1500200)

作者简介: 钱凤魁, 博士, 教授, 研究方向为土地资源利用与评价。

Email: fkqian@163.com

\*通信作者: 顾汉龙, 博士, 副教授, 研究方向为土地资源评价与土地政策评估。Email: allenguhan@126.com

理目标服务时可根据自己的价值取向适当调整 LE 与 SA 的权重比例, 考虑两者的协同关系, 注重耕地保护的长期稳定性和可持续生产能力<sup>[19-20]</sup>。但 LESA 系统需解决的关键问题是选取符合地区特性的简化的指标体系, 而主成分分析 (principal component analysis, PCA) 作为构建最小数据集 (minimum data set, MDS) 的常用方法, 可通过降维减少参评变量, 去除相关性较强的指标, 剔除初选指标间的重叠信息, 解决指标信息代表不全或数据冗余等问题<sup>[21-26]</sup>。本研究在借鉴农用地质量分等规程及耕地质量地力等级评价指标体系和方法基础上, 以辽宁省铁岭县为研究对象, 通过野外调查与土壤采样测定, 采用主成分分析法筛选评价指标建立最小数据集指标体系, 基于 LESA 体系思想构建耕地自然质量与立地条件评价体系, 开展最小数据集与 LESA 体系相结合的耕地质量综合评价, 分析耕地质量区域分布及差异性特征并划定耕地保护分区, 以期研究区摸清耕地质量家底和建立耕地保护分区提供理论和方法借鉴。

## 1 研究区及数据处理

### 1.1 研究区概况

铁岭县位于辽宁省北部 (123°28′~124°33′E, 41°59′~42°33′N), 隶属于铁岭市, 地势呈东南高西北低, 东部为低山丘陵, 平均海拔 200~300 m, 西部为辽河冲积平原, 地势平坦。铁岭县属于中温带季风性气候区, 热量充足, 年平均光照 2 600 h 左右, 四季分明, 气候温和。全县区域总面积 2 262 km<sup>2</sup>, 下辖 15 个乡镇(场), 常驻人口约 32.44 万, 占铁岭市总人口的 13.58%。全县耕地面积 10.87 万 hm<sup>2</sup>, 盛产玉米、水稻、大豆等粮食作物。铁岭县为辽宁省黑土地重点保护区和粮食主产区, 全年粮食产量达 62.4 万 t, 其中水稻产量 13.2 万 t, 玉米产量 48.4 万 t。铁岭县地处沈阳为中心的辽宁中部城市群及以长春为中心的吉林中部城市群的连接带上, 也是沈铁经济一体化的重要节点, 耕地保护既面临保障粮食安全的战略需求, 又面临经济社会发展的压力影响, 具有研究的典型性 (图 1)。

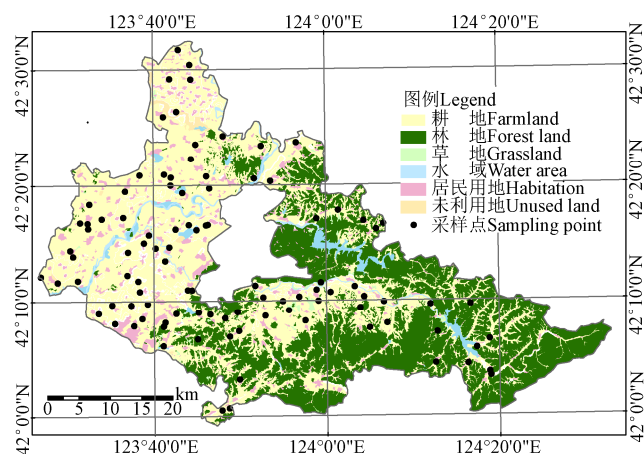


图 1 研究区土壤采样分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil sampling distribution of the study area

### 1.2 数据来源与数据处理

数据来源: 1) 铁岭县土地利用变更调查更新成果, 以提取耕地、农村居民点、河流、农村道路以及城市用地等各类基础地物信息; 2) 铁岭县农用地分等更新数据, 提取有效土层厚度、排水条件、灌溉水源、剖面构型等耕地分等指标数据; 3) 土壤采样数据, 通过试验分析测定土壤基本理化性质指标及重金属污染元素含量。

数据处理: 1) 基于 ArcGIS 软件 Near 工具将目标斑块作为邻近要素、耕地图斑为输入要素, 测算两者间距离获取距居民点、农村道路、河流、城市等距离数据; 用 Feature to line 工具将耕地图斑转换为线状数据, 以 Dissolve 工具测算周边耕地 (生态用地) 与耕地斑块总边长的比例获取农地 (生态) 兼容性数据; 采用 Buffer 工具将单个耕地斑块扩展 10 m 缓冲区范围内相互重叠的耕地总面积作为连片面积, 依据连片面积测算耕地连片度; 统计各耕地斑块周长及单位面积测算田块规整度; 测算路网及沟渠长度与区域面积比值获取密度数据。2) 数据年份均为 2021 年, 矢量数据统一转换为西安 80 坐标系高斯克列格投影 Shape 格式数据, 各类数据均与采样点耕地图斑相关联作为基础数据库, 为后续进行空间插值提供基础。3) 本研究以全县耕地图斑作为评价单元, 共计 29 677 个。采用 Feature to point 工具将耕地图斑转换为点数据, 基于样点评价结果采用值提取至点工具提取耕地点要素的栅格像元值, 关联属性表获取各评价单元的评价分值。

### 1.3 土壤样品采样及测定

本研究运用 ArcGIS 创建随机点工具, 布设共 100 个土壤采样点测定土壤理化指标及重金属污染指标 (图 1)。土壤样品采集于 2021 年 10 月份实施, 样点由 GPS 精确定位, 记录采样点的经纬度, 以定位样点为中心, 20 m 为半径的范围内, 依据地理位置在样点周边选择 2~3 处采集 0~20 cm 表层土壤, 经充分混合后以四分法获取样品。土壤样品经采样、混合、留取后于自封袋中封存并编号, 室内自然风干后弃除土壤侵入物, 经玛瑙研钵碾磨后分别过 2、0.9、0.15 mm 分样筛, 用于土壤样品理化性质不同项目的测试分析。

土壤常规理化性质指标测定参考《土壤农业化学分析》<sup>[27]</sup>, 共测定物理指标、化学指标及重金属污染指标 22 项。土壤容重采用环刀法; 含水率采用烘干法; 采用激光粒度仪测定土壤颗粒组成, 依据中国制分级标准, 以土粒直径大小划分粒级 (小于 0.002 mm 为黏粒, >0.002~0.02 mm 为粉粒, >0.02~2.0 mm 为砂粒), 累计计算各粒级百分数。土壤 pH 值采用电位法 (土水比 1:2.5) 测定; 含盐量采用重量法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法; 全氮测定采用半微量开氏法; 全钾采用火焰光度法测定; 全磷测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法; 有效磷测定采用 Olsen 法; 速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法; 阳离子交换量采用乙酸铵法测定。土壤重金属污染指标镉 Cd、铜 Cu、锌 Zn、镍 Ni、铅 Pb、铬 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法

分析测定；砷 As、汞 Hg 采用原子荧光光谱测定法分析测定。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

2.1.1 评价指标初选

本研究参考农业农村部发布的《耕地质量等级(GB/T 33469—2016)》及自然资源部发布的《农用地质量分等规程(GB/T 28407—2012)》确立的指标体系，融入耕地区位等立地条件，遵循评价指标选取原则从耕地自然质量与耕地立地条件两大方面筛选评价指标。该指标体系遵从耕地三位一体保护要求，综合考虑耕地本底特征及立地优势共选取 34 项评价指标。耕地自然质量分为土壤剖面性状、土壤理化性质以及土壤生态条件三类准则层，立地条件体现耕地与周边环境的协同关系，包括耕地环境条件及区位条件。

其中土壤生态条件采用土壤综合污染指数作为评价指标，由于铅、镉、锌、铜、镍、汞、铬、砷等重金属元素是主要污染物质，若存量超限，可能造成重金属污染甚至危害农作物的生长发育，潜在威胁人体健康。而内梅罗综合指数法作为判断土壤环境质量的常用方法，同时考虑单项污染程度的均值和最大污染指数，能够更全面合理地评价整体生态条件。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$
(1)

$$P_N = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{i\max}^2}{2}}$$
(2)

式中  $P_i$  表示土壤中污染物  $i$  的单项污染指数； $C_i$  为污染物  $i$  的实测值(mg/kg)； $S_i$  为污染物  $i$  的评价标准(mg/kg)，参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15168—2018)》确定。 $P_N$  为内梅罗综合指数即土壤综合污染指数； $P_{i\max}$  表示单项污染指数最大值； $\bar{P}$  为  $P_i$  的算术平均值。

2.1.2 评价指标隶属函数及分级赋值标准

根据研究区土壤特点及评价指标与耕地质量的相关性情况，参考《耕地质量等级(GB/T 33469—2016)》建立指标与耕地质量之间的隶属函数，评估部分指标的实际测算值对耕地质量的影响(表 1)。采用 0~100 分制的封闭数值区间确定其他参评因子的分级赋值标准(表 2)，其中土壤有机质、全氮、全钾、全磷、有效磷、速效钾等养分指标参考《全国第二次土壤普查养分分级标准》；运用等间距法对距离指标、兼容性指标进行分级赋值；采用自然断点法确定土壤综合污染指数、耕地连片度、田块规整度、密度指标的分级赋值标准；概念性指标依据影响程度确定其分级标准。

表 1 耕地质量评价指标隶属函数与参数  
Table 1 Membership function and parameter of evaluation indicators for cultivated land quality

评价指标 Evaluation indicators	隶属函数 Membership function	参数 Parameter					函数类型 Function type
		$a_i$	$c_i$	$u_{i1}$	$u_{i2}$	$b$	
有效土层厚度 Effective depth of soil /cm	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i \leq u_{i2}) \\ 1/[1+a_i(u_i-c_i)^2] & (u_{i2} < u_i < c_i) \\ 1 & (c_i \leq u_i) \end{cases}$	0.000 2	100	0	100	-	戒上型
耕层厚度 Plough layer thickness /cm	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i \leq u_{i2}) \\ 1/[1+a_i(u_i-c_i)^2] & (u_{i2} < u_i < c_i) \\ 1 & (c_i \leq u_i) \end{cases}$	0.002 3	30	0	30	-	戒上型
pH 值 pH value	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i > u_{i2} \text{ 或 } u_i < u_{i1}) \\ 1/[1+a_i(u_i-c_i)^2] & (u_{i1} < u_i < u_{i2}) \\ 1 & (u_i = c_i) \end{cases}$	0.209 7	6.78	0.22	13.32	-	峰型
容重 Bulk density	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i > u_{i2} \text{ 或 } u_i < u_{i1}) \\ 1/[1+a_i(u_i-c_i)^2] & (u_{i1} < u_i < u_{i2}) \\ 1 & (u_i = c_i) \end{cases}$	8.696 0	1.24	0.22	2.26	-	峰型
黏粒 Clay /%	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i \leq u_{i1}) \\ a_i u_i + b & (u_{i1} < u_i \leq u_{i2}) \\ 1 & (u_i > u_{i2}) \end{cases}$	0.136	-	10.00	16.27	-1.220	直线型
粉粒 Silt /%	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i \leq u_{i1}) \\ a_i u_i + b & (u_{i1} < u_i \leq u_{i2}) \\ 1 & (u_i > u_{i2}) \end{cases}$	0.103	-	71.38	77.72	-7.355	直线型
含水率 Water content /%	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i \leq u_{i1}) \\ a_i u_i + b & (u_{i1} < u_i \leq u_{i2}) \\ 1 & (u_i > u_{i2}) \end{cases}$	0.088	-	17.40	26.08	-1.357	直线型
砂粒 Sand /%	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i > u_{i2}) \\ a_i u_i + b & (u_{i1} < u_i \leq u_{i2}) \\ 1 & (u_i \leq u_{i1}) \end{cases}$	-0.082	-	10.58	20.00	1.616	直线型
含盐量 Salt content /(g·kg <sup>-1</sup> )	$y_i = \begin{cases} 0 & (u_i > u_{i2}) \\ a_i u_i + b & (u_{i1} < u_i \leq u_{i2}) \\ 1 & (u_i \leq u_{i1}) \end{cases}$	-7.545	-	0.13	0.26	1.942	直线型

注： $y_i$  为第  $i$  个评价指标的隶属度； $u_i$  为样品实测值； $c_i$  为指标标准值； $a_i$  为系数； $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  分别为指标上、下限值； $b$  为截距。  
Note:  $y_i$  indicates the membership degree of the evaluation indicators;  $u_i$  indicates the sample measured value;  $c_i$  indicates the indicator standard value;  $a_i$  indicates the coefficient;  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  are the upper and lower index limits;  $b$  indicates the intercept.

2.2 最小数据集 MDS

运用 SPSS 20.0 软件对初选指标进行主成分分析，提取特征值大于等于 1 的主成分(principal component, PC)，将指标载荷大于等于 0.5 的评价指标分为一组。若某项指标在不同 PC 上的载荷均大于等于 0.5，则并入至与其他指标相关性较低的一组；若评价指标在各 PC 上的载荷均低于 0.5，则将其划分至载荷值最高的一组。分别计算各组内评价指标的 Norm 值，选取每组中 Norm 值在该组最高分 10%范围内的指标，分析每组所选指标之间的相

关性，依据 Pearson 相关系数大小判断是否保留相应指标，如指标间相关度低，则同组指标均可保留，若各指标之间高度相关，则选取 Norm 值最高的指标进入最小数据集<sup>[21-26]</sup>。Norm 值为该指标在由各成分组成的多维空间中矢量常模的长度，该值越大说明评价指标解释综合信息的能力就越强，计算式如下：

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (u_{ik}^2 e_k)}$$
(3)

式中  $N_{ik}$  表示第  $i$  个指标在特征值大于 1 的前  $k$  个主成分

的 Norm 值;  $u_{ik}$  表示第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分的载荷;  $e_k$  为第  $k$  个主成分的特征值。

表 2 耕地质量评价指标分级赋值标准  
Table 2 Cultivated land quality evaluation indicators grading standard

评价指标 Evaluation indicators	1 级 Level 1		2 级 Level 2		3 级 Level 3		4 级 Level 4		5 级 Level 5		6 级 Level 6	
	指标值 Value	分值 Score	指标值 Value	分值 Score	指标值 Value	分值 Score	指标值 Value	分值 Score	指标值 Value	分值 Score	指标值 Value	分值 Score
耕层质地 Plough layer texture	中壤	100	轻壤	90	重壤	85	砂壤	70	黏土	60	砂土	50
质地构型 Soil texture profile	上松 下紧	100	海绵型	95	紧实型	60	薄层型	50	松散型	40	/	/
土壤综合污染指数 Soil comprehensive pollution index	[0.305, 0.390]	100	[0.390, 0.475]	80	[0.475, 0.590]	60	[0.590, 0.783]	40	[0.783, 1.388]	20	/	/
有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	> 40	100	[30, 40]	85	[20, 30]	60	[10, 20]	40	[6, 10]	20	< 6	10
有效磷 Available P /(mg·kg <sup>-1</sup> )	> 40	100	[20, 40]	85	[10, 20]	70	[5, 10]	55	[3~5]	30	< 3	10
速效钾 Available K /(mg·kg <sup>-1</sup> )	> 200	100	[150, 200]	85	[100, 150]	65	[50, 100]	45	[30~50]	30	< 30	15
全磷 Total P /(g·kg <sup>-1</sup> )	> 1	100	[0.8, 1]	85	[0.6, 0.8]	65	[0.4, 0.6]	45	[0.2~0.4]	20	< 0.2	10
全钾 Total K /(g·kg <sup>-1</sup> )	> 25	100	[20, 25]	80	[15, 20]	60	[10, 15]	40	[5~10]	20	< 5	10
全氮 Total N /(g·kg <sup>-1</sup> )	> 2	100	[1.5, 2]	80	[1, 1.5]	65	[0.75, 1]	45	[0.5~0.75]	20	< 0.5	10
阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	> 24.9	100	[18.1, 24.9]	85	[13.4, 18.1]	60	[9.3, 13.4]	40	< 9.3	20	/	/
耕地利用类型 Farmland use type	水田	100	水浇地	80	旱地	60	/	/	/	/	/	/
地形部位 Terrain parts	平原中阶	100	丘陵下部	80	平原低阶	75	丘陵上部	60	山地坡中	55	/	/
农田林网化率 Farmland shelter rate	高	100	中	80	低	50	/	/	/	/	/	/
排水条件 Drainage condition	1 级	100	2 级	90	3 级	70	4 级	30	/	/	/	/
灌溉能力 Irrigation capacity	充分满足	100	满足	85	基本满足	60	不满足	40	/	/	/	/
耕地连片度 Contiguous degree of farmland	> 0.870	100	[0.764, 0.870]	80	[0.634, 0.764]	60	[0.468, 0.634]	40	< 0.468	20	/	/
田块规整度 Field regularity	< 1.02	100	[1.02, 1.06]	80	[1.06, 1.1]	60	[1.1, 1.15]	40	> 1.15	20	/	/
距居民点距离 Distance from residential area /km	< 0.3	100	[0.3, 0.6]	80	[0.6, 0.9]	60	[0.9, 1.2]	40	> 1.2	20	/	/
距农村道路距离 Distance from road /km	< 1	100	[1, 2]	80	[2, 3]	60	[3, 4]	40	[4, 5]	20	> 5	10
距城市距离 Distance from town/km	< 4	100	[4, 8]	80	[8, 12]	60	[12, 16]	40	[16, 20]	20	> 20	10
距河流距离 Distance from river and lake /km	< 0.4	100	[0.4, 0.8]	80	[0.8, 1.2]	60	[1.2, 1.6]	40	> 1.6	20	/	/
农地兼容性 Farmland compatibility	> 0.8	100	[0.6, 0.8]	80	[0.4, 0.6]	60	[0.2, 0.4]	40	< 0.2	20	/	/
生态兼容性 Ecological compatibility	> 0.8	100	[0.6, 0.8]	80	[0.4, 0.6]	60	[0.2, 0.4]	40	< 0.2	20	/	/
路网密度 Road network density	> 2.5	100	[1.0, 2.5]	80	[0.6, 1.0]	60	[0.3, 0.6]	40	[0.1, 0.3]	20	< 0.1	10
沟渠密度 Ditches density	> 0.5	100	[0.3, 0.5]	80	[0.25, 0.3]	60	[0.15, 0.25]	40	[0.1, 0.15]	20	< 0.1	10

2.3 土地评价与立地条件分析 (LESA)

2.3.1 耕地自然质量条件评价模型

根据耕地条件属性数据, 运用加权指数模型并依据分级赋值原则确定各评价单元的耕地自然质量条件分值, 计算式如下:

$$F_{LE} = \sum_{j=1}^n (f_{ij} \cdot w_{ij}) \tag{4}$$

式中  $F_{LE}$  为耕地自然质量条件分值;  $f_{ij}$  为第  $i$  个评价单元第  $j$  个因素评价分值;  $w_{ij}$  为第  $i$  个评价单元第  $j$  个因素评价权重。

2.3.2 耕地立地环境条件评价模型

耕地立地环境条件评价系统以耕地周边环境来判别其长期稳定发展程度, 包含区位因素及基础设施完善度等, 基于耕地立地环境条件评价模型计算各个评价单元的耕地立地环境条件分值, 计算式如下:

$$F_{SA} = \sum_{j=1}^m (g_{ij} \cdot w_{ij}) \tag{5}$$

式中  $F_{SA}$  为耕地立地环境条件分值;  $g_{ij}$  为第  $i$  个评价单元第  $j$  个因素评价分值;  $w_{ij}$  为第  $i$  个评价单元第  $j$  个因素评价权重。

2.3.3 LESA 综合评价模型

LESA 体系的构建是基于 LE 与 SA 两个子系统评价结果的综合分析, 既可以科学评价耕地自然质量条件, 又能够评价耕地立地条件稳定性特征, 还可以根据不同评价目的, 灵活赋予两个评价体系不同的权重。

$$F_{LESA} = \alpha F_{LE} + \beta F_{SA} \tag{6}$$

式中  $F_{LESA}$  为综合评价分值;  $\alpha$  和  $\beta$  为权重比例系数。

2.4 耦合协同模型

采用耦合协同模型确定 LE 体系与 SA 体系的权重比例系数  $\alpha$ 、 $\beta$ , 耦合协同度  $D$  范围为 0~1, 数值越高说明

体系间耦合关系越协同，综合发展水平越高。借鉴以往研究表明耦合协同度最大值相应的比值即为两体系最优权重比例<sup>[28-29]</sup>。

$$C = \frac{2\sqrt{F_{LE} \cdot F_{SA}}}{F_{LE} + F_{SA}}$$

(7)

$$D = C \cdot F_{LESA}$$

(8)

式中  $C$  为体系间的耦合度，理论范围为[0,1]，数值越大代表耦合程度越高，反之则说明体系间并无关联。

2.5 耕地质量评价精度验证

为验证基于 MDS 与 LESA 体系的耕地质量综合评价结果的精度，利用 Nash 有效系数  $E_f$ 和相对偏差系数  $E_r$ 评价模型的精度<sup>[30]</sup>。Nash 有效系数越接近于 1，表示基于 MDS 与 LESA 测算的评价分值与基准值越接近，精度较高；相对偏差系数越接近于 0，表明基于 MDS 与 LESA 测算值相对于基准值偏差越小，结果越精确。

$$E_f = 1 - \frac{\sum (R_o - R_{cal})^2}{\sum (R_o - \bar{R}_o)^2}$$

(9)

$$E_r = \frac{\left| \sum_{i=1}^n R_o - \sum_{i=1}^n R_{cal} \right|}{\sum_{i=1}^n R_o}$$

(10)

式中  $R_o$  和  $\bar{R}_o$  为全要素指标测算的耕地质量评价分值及平均值； $R_{cal}$ 为基于 MDS 与 LESA 体系的耕地质量综合评价分值。

3 结果与分析

3.1 基于主成分分析建立最小数据集

基于主成分分析结果，计算各指标 Norm 值(表 3、表 4)，土壤自然质量评价指标中特征值大于等于 1 的主成分有 7 个，累计贡献率为 73.358%，立地环境评价指标中特征值大于等于 1 的有 6 个主成分，累计贡献率达 67.542%，将指标载荷大于等于 0.5 的评价指标分为一组，若评价指标载荷均低于 0.5，则将其划分至载荷值最高的一组。由于限制条件要求指标 Norm 值在该组最高分值 10%范围，结合双变量相关分析，综合比选 Norm 值及 Pearson 相关系数，比较已选指标避免重复性及数据冗余，最终筛选砂粒、有机质含量、全钾、有效磷、pH 值、土壤综合污染指数、耕层质地、土壤容重、阳离子交换量建立自然质量最小数据集，选取排水条件、连片度、生态兼容性、河流距离、路网密度、灌溉能力、农田林网化率、耕地利用类型建立立地环境最小数据集。

与其他研究相比<sup>[22,24]</sup>，有效土层厚度未进入 MDS 主要原因在于研究区有效土层厚度为 25~100 cm，均值 49.45 cm，其中大于等于 45 cm 频率为 75%，筛选过程中与同组其他指标均存在较高相关性且组内有效磷 Norm 值最大。研究区耕层厚度大于等于 20 cm 的耕地超过 95%，数据间无明显差异，较为均一，与实际关联度不高，在筛选过程中与耕层质地存在较高相关性(−0.373\*\*)且 Norm 值组内最小未入选 MDS。因此研究区域尺度和样本数据也是 MDS 指标筛选的重要因素。

表 3 耕地自然质量评价指标主成分载荷矩阵及 Norm 值计算结果  
Table 3 Principal component loading matrix and calculated Norm values of cultivated land natural quality evaluation indicators

评价指标 Evaluation indicators	分组 Group	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	Norm 值
砂粒 Sand	1	0.820	0.118	0.097	0.068	-0.304	-0.282	-0.021	1.762
全氮 Total N	1	0.804	0.220	0.004	0.047	-0.268	-0.340	-0.052	1.754
有机质含量 Sand organic matter	1	-0.786	-0.16	-0.067	0.459	-0.235	-0.062	-0.010	1.755
粉粒 Silt	1	0.610	0.156	-0.218	-0.484	0.452	-0.005	0.109	1.54
黏粒 Clay	1	0.567	0.061	0.518	-0.109	-0.299	0.136	-0.169	1.451
含水率 Water content	1	0.524	0.346	-0.082	0.523	0.359	0.045	-0.157	1.451
全钾 Total K	2	-0.486	0.218	0.362	0.126	0.092	0.016	0.084	1.197
有效土层厚度 Effective depth of soil	3	-0.161	0.670	0.080	0.090	-0.169	-0.282	0.158	1.207
有效磷 Available P	3	0.383	-0.646	0.196	0.046	0.314	-0.281	0.142	1.423
质地构型 Soil texture profile	3	-0.062	0.639	0.473	-0.003	0.051	-0.243	0.004	1.270
土壤综合污染指数 Soil comprehensive pollution index	3	0.062	-0.614	0.505	0.162	0.030	0.161	0.303	1.300
全磷 Total P	3	0.404	-0.529	-0.165	0.012	0.107	-0.154	-0.359	1.282
pH 值 pH value	2	0.153	0.458	0.106	-0.173	0.418	0.401	0.126	1.070
速效钾 Available K	4	0.386	-0.286	0.608	-0.011	-0.147	0.137	0.330	1.330
耕层质地 Plough layer texture	4	-0.324	0.033	0.58	0.132	0.337	-0.009	-0.488	1.250
耕层厚度 Plough layer thickness	4	0.250	0.047	-0.512	0.110	-0.248	0.363	0.180	1.048
容重 Bulk density	5	-0.411	0.099	0.201	-0.637	-0.128	-0.091	0.164	1.231
含盐量 Salt content	5	0.369	0.259	0.055	0.555	0.113	0.172	0.333	1.184
阳离子交换量 Cation exchange capacity	6	0.271	0.095	0.194	-0.100	-0.326	0.573	-0.386	1.048
特征值 Eigenvalue		4.205	2.596	2.076	1.572	1.299	1.165	1.024	-
方差贡献率 Variance contribution rate/%		22.130	13.665	10.928	8.276	6.839	6.130	5.392	-
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%		22.130	35.794	46.722	54.998	61.837	67.967	73.358	-

表 4 耕地立地环境评价指标主成分载荷矩阵及 Norm 值计算结果

Table 4 Principal component loading matrix and calculated Norm values of cultivated land site condition evaluation indicators

评价指标 Evaluation indicators	分组 Group	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	Norm 值
排水条件 Drainage condition	1	-0.855	0.198	-0.117	0.07	-0.029	-0.022	1.435
地形部位 Terrain parts	1	-0.753	0.350	-0.017	0.252	0.036	0.181	1.372
距农村道路距离 Distance from road	1	0.668	0.193	0.401	0.095	-0.201	0.234	1.292
耕地连片度 Contiguous degree of farmland	2	0.018	0.634	0.157	0.353	-0.170	-0.307	1.076
农地兼容性 Farmland compatibility	2	0.075	-0.568	0.211	0.453	-0.127	0.032	1.022
距城市距离 Distance from town	2	0.342	0.562	-0.330	0.059	0.017	-0.001	1.067
生态兼容性 Ecological compatibility	3	0.355	-0.360	-0.359	0.348	-0.049	-0.222	1.023
距居民点距离 Distance from residential area	4	-0.111	0.013	0.697	-0.008	0.367	0.045	1.029
距河流距离 Distance from river and lake	4	0.465	0.429	0.539	0.072	0.128	0.244	1.244
沟渠密度 Ditches density	3	0.389	-0.006	-0.403	0.058	0.045	0.316	0.898
路网密度 Road network density	5	-0.138	-0.374	0.187	-0.679	-0.037	0.242	1.049
灌溉能力 Irrigation capacity	6	0.043	-0.176	0.212	0.079	0.698	-0.521	1.023
农田林网化率 Farmland shelter rate	3	-0.146	-0.449	0.408	0.351	-0.493	-0.084	1.109
田块规整度 Field regularity	3	0.246	-0.256	-0.309	0.315	0.452	0.311	0.977
耕地利用类型 Farmland use type	7	-0.435	-0.066	0.055	0.407	0.216	0.507	1.042
特征值 Eigenvalue		2.665	1.995	1.765	1.395	1.226	1.085	-
方差贡献率 Variance contribution rate/%		17.766	13.299	11.770	9.301	8.175	7.232	-
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%		17.766	31.064	42.834	52.135	60.31	67.542	-

3.2 LESA 评价体系构建及插值精度分析

基于自然质量最小数据集及立地环境最小数据集，采用考虑自然质量与立地环境协同关系的 LESA 评价模型开展研究区耕地质量评价，利用提取公因子方差法计算评价因子权重，依据式（4）～（5）计算采样点耕地自然质量评价分值为 52.673～92.635，立地环境评价分值为 36.0～84.1。根据式（7）计算耦合度  $C$  为 0.217～1.000，均值 0.816，表明 LE 体系与 SA 体系间高度良性耦合，相互作用关系较强，体现 LESA 评价体系的显著优势。采用耦合协同模型确定 LE 体系及 SA 体系之间的最优比例，运用代入法，假设两体系可能的整数值比例，依次列出比值 1：9 至 9：1，权重 1：9、2：8、3：7、4：6、5：5、6：4、7：3、8：2、9：1 比例下各的耦合协同度值分别为 0.755、0.764、0.770、0.773、0.775、0.774、0.772、0.768、0.761，最终确立 LESA 评价体系为： $F_{LESA}=0.5F_{LE}+0.5F_{SA}$ ，结合式（6）测算采样点 LESA 综合评价分值为 51.517～81.838。

经比选各空间插值方法的精确性及适用性，以样点评价结果为基础，通过交叉验证对比各空间插值精度：标准平均误差 MSE 及平均值误差 ME 趋于 0；标准均方根误差 RMSSE 越趋于 1；平均标准误差 ASE 与均方根误差 RMSE 趋于一致，表明其插值结果的预测精度越高。表 5 为各插值方法的交叉验证检验误差结果，协同克里金的 MSE、ME 最趋于 0，普通克里金的 RMSSE 最趋于 1，且 ASE 与 RMSE 最为近似，最终采用普通克里金法进行插值预测，通过关联属性表得到各评价单元的耕地质量综合评价分值区间为 52.148～79.624，均值为 66.678。

表 5 各插值方法的交叉验证检验结果

Table 5 Cross-validation test error results for different interpolation methods

插值方法 Interpolation methods	MSE	RMSSE	ASE	RMSE	ME
协同克里金 Co-Kriging	0.002	1.035	5.676	5.817	0.068
普通克里金 Ordinary Kriging	0.004	1.010	5.735	5.765	0.078
泛克里金 Universal Kriging	0.013	1.010	5.671	5.724	0.119
简单克里金 Simple Kriging	0.052	1.016	5.596	5.655	0.344
经验贝叶斯克里金法 Empirical Bayesian Kriging	0.037	1.018	5.710	5.813	0.250
反距离权重 Inverse distance weight	-	-	-	5.770	0.398

注：MSE 为标准平均误差；RMSSE 为标准均方根误差；ASE 为平均标准误差；RMSE 为均方根误差；ME 为平均值误差。

Note: MSE indicates mean standardized error; RMSSE indicates root mean square standardized error; ASE indicates average standard error; RMSE indicates root mean square error; ME indicates mean error.

3.3 基于 MDS 与 LESA 体系的耕地质量综合评价结果分析

本研究考虑耕地产能情况及耕地质量评价结果差异性结合自然断点法将耕地资源分级划分为 5 个等级区，1 级耕地质量最佳，5 级耕地质量最差（图 2）。铁岭县耕地质量总体呈现“西北优，东南劣”的分布态势，耕地质量等级面积比例排序依次为：2 级（36.79%）、3 级（23.60%）、1 级（20.52%）、4 级（12.73%）、5 级（6.36%）。依据不同等级区耕地质量区域分布特征，建立耕地保护利用分区。其中 1 级区耕地质量分值位于 71.514～79.624，耕地面积为 22 294.396 hm<sup>2</sup>，呈团状高度连片分布于中部平原地区，耕地土壤及立地条件优势显著，农业生产潜力及环境协同性优越，灌溉水源充足，基础设施条件良好，道路通达度高，无限制因素条件，可作为永久基本农田核心保护区。2 级区耕地质量分值为 67.959～71.513，耕地面积为 39 974.407 hm<sup>2</sup>，占比最大，多集聚于 1 级区



周边,集中于蔡牛乡、凡河镇。区域性土壤有机质含量及生态兼容性相对较低,受耕地土壤养分条件限制,但立地条件较优,可作为耕地自然地力条件重点治理区。3级区分值范围为 64.294~67.958,耕地面积为 25 649.334 hm<sup>2</sup>,多呈条带集中分布于铁岭县西南部新台子镇、李千户乡,少数呈团状集聚于北部。土壤养分条件一般但立地条件相对较优,有效磷含量较低,耕地连片程度较高但存在少数轻度污染。4级区耕地质量分值为 60.647~64.293,耕地面积为 13 837.926 hm<sup>2</sup>,位于东北部丘陵区与山地区交界处,分布于大甸子镇、鸡冠山乡,土壤基础条件较差,有机质含量较低,灌溉能力不足。由于3级区和4级区耕地土壤和立地条件均存在多样性的限制因素,可作为耕地综合整治区,面积占比 36.33%。5级区耕地质量指数为 52.148~60.646,耕地面积为 6 913.914 hm<sup>2</sup>,多集聚分布于丘陵区及东部山地区,少部分呈团分布于铁岭县南部腰堡镇及李千户乡。耕地排水条件、路网密度等立地条件差,耕地零散破碎,连片度较低,但考虑该区域与周边生态环境的协同保护问题,可作为耕地生态自然保育区。

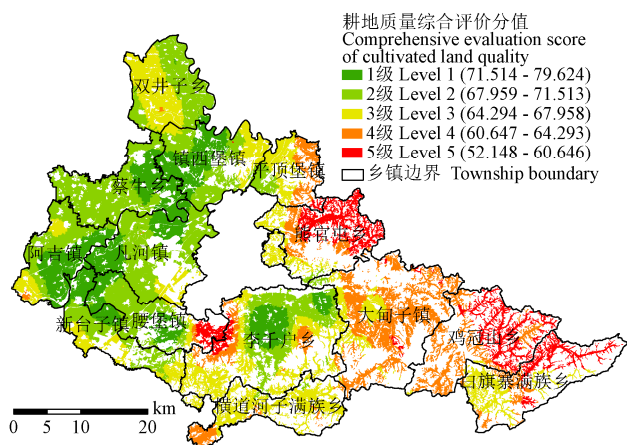


图2 基于MDS与LESA体系结合的铁岭县耕地质量评价空间分布图

Fig.2 Cultivated land quality evaluation spatial distribution in Tieling county based on MDS and LESA

### 3.4 基于MDS与LESA体系的耕地质量评价结果合理性验证

本研究构建的全要素评价指标体系与现有国家相关标准衔接,是农用地质量分等规程与耕地质量等级评价成果的一种综合、全面的指标特征,能够从整体上进行科学评价,具备合理性和准确性。相关文献的指标选取频率表明土壤容重、含水率、机械组成(黏粒、粉粒、砂粒)为使用频率前三位的物理指标,化学指标有机质、有效磷、速效钾、pH值、全氮、全磷、全钾、阳离子交换量使用频率均为前十位,且有机质选取频率最高,为核心指标,土壤综合污染指数评价指标选取的重金属元素Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、As、Hg、Ni为使用频率前八位的环境指标<sup>[31]</sup>。进一步说明全要素评价指标体系能够较为全面地反映耕地质量特征,满足耕地质量评价的科学性要求,但不足之处在于指标间冗余程度较大,难以快速获取耕地质量数据,且涉及要素较复杂,增加了工作量和投入成本。为过滤指标间可能存在的重叠信息,

避免全要素指标的冗余性,本研究基于主成分分析结合Norm值与相关性的方法建立MDS,筛选后指标过滤率达到50%,最终由土壤容重、pH值、有机质含量、有效磷、全钾含量、砂粒等构建耕地质量评价指标体系,与相关研究结果趋于一致<sup>[21,23,25-26]</sup>,进一步证明该体系评价指标较为简洁,表达特征明显。本研究在MDS筛选指标结果基础上,构建了基于自然质量与立地环境的耕地质量综合评价体系(LESA体系),综合耕地自然质量与立地环境两方面优势特征,同时引入耦合协同模型量化了LE与SA体系间的协同关系。因此采用MDS与LESA体系相结合的评价方法构建简化、精确的耕地质量评价指标体系,以满足特定区域耕地质量评价工作开展的需要,是在目前农用地分等以及耕地质量等级成果基础上的一种方法探索,通过优化耕地质量评价指标,量化耕地自然质量与立地环境的协同关系,为县域开展精准耕地质量综合评价提供参考借鉴。

为验证基于MDS与LESA体系的耕地质量综合评价结果的精度,基于样点数据比较全要素指标计算的耕地质量分值和基于MDS与LESA体系计算的耕地质量分值的一致性。结果表明全要素耕地质量分值为 53.267~81.995,均值 66.778,变异系数为 8.49%,基于MDS与LESA体系的耕地质量分值为 51.517~81.838,均值 67.355,变异系数为 9.37%,变异系数的波动幅度相对较大。通过对基于MDS与LESA体系的耕地质量分值与全要素耕地质量分值进行回归分析(图3),发现两者呈极显著正相关关系:  $y=0.933x+5.079$  ( $R^2=0.701$ ,  $n=100$ ,  $P<0.001$ ),说明MDS指标可以反映全要素指标的信息。根据式(9)~(10)测算Nash有效系数为 0.615,相对偏差系数为 0.009,说明基于MDS与LESA体系的耕地质量分值与全要素耕地质量分值较为近似,评价结果可信度较高,且相对偏差更小,评价精度较高,进一步证明基于MDS与LESA体系开展耕地质量评价准确性更高,可替代全要素指标对研究区耕地质量进行评价。

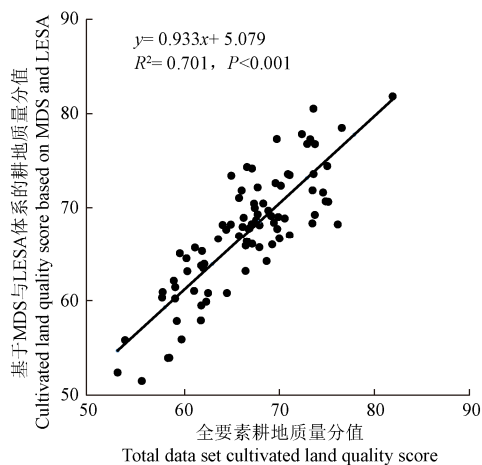


图3 基于MDS与LESA体系的耕地质量分值和全要素耕地质量分值的相关性

Fig.3 Correlation of cultivated land quality score based on MDS (minimum data set) and LESA (land evaluation and site assessment) and total data set cultivated land quality score

## 4 结 论

1) 通过采用主成分分析法建立县域耕地质量评价的自然质量条件指标和立地环境条件指标的最小数据集。其中选取砂粒、有机质含量、全钾、有效磷、pH 值、土壤综合污染指数、耕层质地、土壤容重、阳离子交换量建立耕地自然质量最小数据集, 耕地立地环境最小数据集包括排水条件、连片度、生态兼容性、距河流距离、路网密度、灌溉能力、农田林网化率、耕地利用类型。采用 LE 系统和 SA 系统评价模型测算结果表明采样点耕地自然质量指数为 52.673~92.635, 立地环境指数为 36.0~84.1。运用耦合协同模型构建 LESA 综合评价体系为:  $F_{LESA}=0.5F_{LE}+0.5F_{SA}$ , 研究区采样点 LESA 综合评价分值为 51.517~81.838。经比选各误差检验结果选取普通克里金法进行插值, 测算评价单元耕地质量综合分值为 52.148~79.624。

2) 耕地质量评价结果分析表明, 研究区可划分为 5 个等级的耕地保护利用分区。其中 1 级区耕地土壤条件和立地条件优势显著, 可作为永久基本农田核心保护区, 占比 20.52%; 2 级区土壤有机质含量及生态兼容性相对较低, 受耕地土壤养分条件限制, 但立地条件较优, 可作为耕地自然地力条件重点治理区, 占比 36.79%; 由于 3 级区和 4 级区耕地土壤和立地条件均存在多样性的限制因素, 可作为耕地综合整治区, 占比 36.33%; 5 级区耕地零散破碎连片度较低, 无立地条件优势, 可作为耕地生态自然保育区, 占比 6.36%。

3) 最小数据集指标筛选过滤率为 50%, 消除了指标间的冗余, 评价体系显著简化, 表达特征明显。经计算基于 MDS 与 LESA 相结合的评价结果 Nash 有效系数为 0.615, 相对偏差系数为 0.009, 说明该体系耕地质量评价分值与基准值更接近且偏差小, 评价结果更精确, 进一步证明 MDS 筛选指标的精简性以及 LESA 评价体系结合的适配性。

### [参 考 文 献]

- [1] 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 with English abstract)
- [2] 程晋南, 赵庚星, 张子雪, 等. 基于 GIS 的小尺度耕地质量综合评价研究: 以山东省丁庄镇为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 536-544.  
CHENG Jinnan, ZHAO Gengxing, ZHANG Zixue, et al. GIS supported comprehensive evaluation of cultivated land quality at small scale - A case study in Dingzhuang town of Shandong province[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3): 536-544. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵小娟. 珠江三角洲地区不同尺度耕地质量评价与空间布局[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.  
ZHAO Xiaojuan. Evaluating the Cultivated Land Quality and Its Spatial Variability Across the Pearl River Delta[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马瑞明, 马仁会, 韩冬梅, 等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 249-257.  
MA Ruiming, MA Renhui, HAN Dongmei, et al. Construction of cultivated land quality evaluation system in provincial level based on multilevel indicators[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 249-257. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265-273.  
LI Pengfei, ZHANG Xingchang, HAO Mingde, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(16): 265-273. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙晓兵, 孔祥斌, 张青璞, 等. 基于指标综合特征的耕地遗传质量和动态质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 254-265.  
SUN Xiaobing, KONG Xiangbin, ZHANG Qingpu, et al. Evaluation of inherent quality and dynamic quality of cultivated land based on comprehensive characteristics of indexes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 254-265. (in Chinese with English abstract)
- [7] 奉婷, 张凤荣, 李灿, 等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 200-210.  
FENG Ting, ZHANG Fengrong, LI Can, et al. Spatial distribution of prime farmland based on cultivated land quality comprehensive evaluation at county scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 200-210. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吕慧敏, 吴克宁, 周勇, 等. 基于农用地分等的耕地质量主导限制型研究[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(7): 11-18.  
LV Huimin, WU Kening, ZHOU Yong, et al. Dominant limiting types of the quality of cultivated land based on agricultural land gradation[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(7): 11-18. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黄厅厅, 卢德彬, 杨建, 等. 基于 GIS 的省级耕地质量综合评价及时空演变分析: 以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 253-257.  
HUANG Tingting, LU Debin, YANG Jian, et al. Comprehensive evaluation and analysis on spatiotemporal variation of cultivated land on provincial scale based on GIS-A case study in Guizhou province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 253-257. (in Chinese with English abstract)
- [10] 钱凤魁, 张琳琳, 贾璐, 等. 基本农田划定中的耕地立地



- 条件评价研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3): 447-456.
- QIAN Fengkui, ZHANG Linlin, JIA Lu, et al. Site condition assessment during prime farmland demarcating[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 447-456. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵小娟, 叶云, 周晋皓, 等. 珠三角丘陵区耕地质量综合评价及指标权重敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 226-235.
- ZHAO Xiaojuan, YE Yun, ZHOU Jinhao, et al. Comprehensive evaluation of cultivated land quality and sensitivity analysis of index weight in hilly region of Pearl River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 226-235. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘洪彬, 王冰, 王秋兵, 等. 基于农户微观视角下的耕地土壤有机质时空演变规律研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 319-326.
- LIU Hongbin, WANG Bing, WANG Qiubing, et al. Study on the spatial and temporal evolution of the soil organic matter of the cultivated land based on the microscopic perspective of the household[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 319-326. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邝佛缘, 陈美球, 鲁燕飞, 等. 生计资本对农户耕地保护意愿的影响分析: 以江西省 587 份问卷为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(2): 58-66.
- KUANG Foyuan, CHEN Meiqiu, LU Yanfei, et al. The impact of farmers' livelihood capital on the willingness of cultivated land protection: Based on the investigation data from 587 farmer in Jiangxi Province[J]. China Land Science, 2017, 31(2): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- [14] 钱凤魁, 王秋兵, 边振兴, 等. 凌源市耕地质量评价与立地条件分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 325-329.
- QIAN Fengkui, WANG Qiubing, BIAN Zhenxing, et al. Farmland quality evaluation and site assessment in Lingyuan City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 325-329. (in Chinese with English abstract)
- [15] 钱凤魁, 王秋兵, 李娜. 基于耕地质量与立地条件综合评价的高标准基本农田划定[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 225-232.
- QIAN Fengkui, WANG Qiubing, LI Na. High-standard prime farmland planning based on evaluation of farmland quality and site conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 225-232. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曲衍波, 朱伟亚, 鄢文聚, 等. 基于压力-状态-响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 241-249.
- QU Yanbo, ZHU Weiya, YUN Wenju, et al. Land consolidation spatial pattern and diagnosis of its obstacle factors based on pressure-state-response model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 241-249. (in Chinese with English abstract)
- [17] 叶云, 赵小娟, 胡月明, 等. 基于 GA-BP 神经网络的珠三角耕地质量评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 964-973.
- YE Yun, ZHAO Xiaojuan, HU Yueming, et al. Evaluation of cultivated land quality in Pearl River Delta based on GA-BP neural network[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(5): 964-973. (in Chinese with English abstract)
- [18] 唐宗, 周悟, 杨颢, 等. 基于交互效应 Logistic 回归模型的耕地质量评价方法研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2394-2403.
- TANG Zong, ZHOU Wu, YANG Hao, et al. Evaluation of cultivated land quality Based on Interactive Logistic Regression Model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2394-2403. (in Chinese with English abstract)
- [19] Richard W D, Roe D R. Implementing LESA in Whitman county, Washington[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(2): 87-89.
- [20] 钱凤魁, 张靖野, 王秋兵, 等. 基于聚类图谱的基本农田领域文献分析及进展[J]. 中国土地科学, 2017, 31(4): 80-87.
- QIAN Fengkui, ZHANG Jingye, WANG Qiubing, et al. Literature review on the research progress of basic farmland field based on the Cluster Map[J]. China Land Science, 2017, 31(4): 80-87. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 16-25.
- LI Guilin, CHEN Jie, TAN Manzhi, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16-25. (in Chinese with English abstract)
- [22] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(7): 155-164. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 325-334.
- WU Haiyan, JIN Rongde, FAN Zuowei, et al. Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 325-334. (in Chinese with English abstract)
- [24] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰, 等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 132-138.
- QIAO Yunfa, ZHONG Xin, MIAO Shujie, et al. Evaluation indicators of soil quality in plough layer of aeolian sandy land in Northeast China based on minimum data set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- [25] 梅楠, 谷岩, 李德忠, 等. 基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 91-98.
- MEI Nan, GU Yan, LI Dezhong, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on

- minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- [26] 卓志清, 李勇, 勾宇轩, 等. 基于最小数据集的东北旱作区耕层质量评价与障碍诊断[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 321-330.
- ZHUO Zhiqing, LI Yong, GOU Yuxuan, et al. Quality evaluation and obstacle diagnosis of plough horizon based on minimum data set in dry farming region of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 321-330. (in Chinese with English abstract)
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-10.
- [28] 魏金义, 祁春节. 农业技术进步与要素禀赋的耦合协调度测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 90-96.
- WEI Jinyi, QI Chunjie. Coupling coordination degree of the agriculture technology progress and factor endowment in China[J]. China Population-Resources and Environment, 2015, 25(1): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [29] 钱凤魁, 王卫雯, 王秋兵. 基于耦合协调度模型量化耕地自然质量与立地条件协同关系[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 284-291.
- QIAN Fengkui, WANG Weiwen, WANG Qiubing. Quantification of synergetic relationship between natural quality and site conditions of cultivated land based on coupling coordination degree model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 284-291. (in Chinese with English abstract)
- [30] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part 1: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [31] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056.
- LI Xin, ZHANG WenJu, WU Lei, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056. (in Chinese with English abstract)

## Evaluating cultivated land quality in county territory using the minimum data set, land evaluation and site assessment (LESA)

QIAN Fengkui, XIANG Zixuan, WANG Hexing, GU Hanlong<sup>\*</sup>

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 2. Key Laboratory of Trinity Protection and Monitoring of Cultivated Land, Shenyang 110161, China; 3. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** County-cultivated land can be evaluated to rapidly and accurately determine the quality background for the protection zone. In this study, the minimum data set was established to streamline the selection index using principal component analysis (PCA). A land evaluation and site assessment (LESA) system was then constructed to comprehensively evaluate the cultivated land quality. The regional distribution of cultivated land quality was finally obtained to divide the cultivated land protection zone. The results showed that: 1) The minimum data set of the natural quality index was composed of sand, organic matter, total potassium, available phosphorus, pH, soil comprehensive pollution index, topsoil texture, bulk density, and cation exchange capacity. The minimum data set of the site condition index was the drainage conditions, consecutive degree, ecological compatibility, river distance, road network density, irrigation capacity, farmland forest network rate, and cultivated land utilization type. 2) The LESA model was used to calculate the natural quality score of cultivated land and the site environment. The coupled cooperative model was used to determine the LESA system as  $F_{LESA}=0.5F_{LE}+0.5F_{SA}$ . The comprehensive evaluation score of the sample point ranged from 51.517 to 81.838. The interpolation error test was carried out to combine each space interpolation. The ordinary Kriging method was also used for the spatial interpolation of cultivated land quality. The comprehensive score of cultivated land quality was 52.148 to 79.624 in the evaluation unit. 3) The overall distribution trend of cultivated land quality was "excellent in the center, but inferior in the east and west". The cultivated land resources in Tieling County were divided into five grades: The cultivated land area of Grade 1 was 22 294.396 hm<sup>2</sup> (accounting for 20.52%), indicating the permanent protection area of basic cultivated land. The Grade 2 area was 39 974.407 hm<sup>2</sup> (accounting for 36.79%), including the key control area in the natural fertility conditions of cultivated land. The Grade 3 and 4 areas were 25 649.334, and 13 837.926 hm<sup>2</sup>, respectively. Less diversity was found under the soil and site conditions of cultivated land in Grade 3 and 4 areas. The comprehensive improvement area of cultivated land then accounted for 36.33%. The Grade 5 area was 6 913.914 hm<sup>2</sup> (accounting for 6.36%), indicating the ecological and natural conservation area of cultivated land. 4) The minimum data set of the indicator screening filter rate was 50%. The redundancy between the indicators was removed to significantly simplify the indicator for the key characteristics. A comparison was performed on the Nash effective coefficient and relative deviation coefficient. The evaluation value of cultivated land quality using MDS and LESA was closer to the benchmark, indicating a small deviation. The index system was simplified to quantify the synergistic relationship between natural quality and site conditions during quality evaluation. The finding can provide a strong reference to improve the quality, protection, and utilization of the county-cultivated land.

**Keywords:** cultivated land; quality evaluation; minimum data set; land evaluation and site assessment system; Tieling county