



刘湘君, 刘长河, 徐圣贤, 刘冬, 刘建东, 乔冠宇, 周文涛, 黄元仿. 基于赋权-Topsis模型组合的梨树县耕地质量评价及障碍因子分析[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(10):10-24.

LIU Xiangjun, LIU Changhe, XU Shengxian, LIU Dong, LIU Jiandong, QIAO Guanyu, ZHOU Wentao, HUANG Yuanfang. Cultivated land quality evaluation and obstacle factor analysis of Lishu County based on the weighting and Topsis model combination[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(10): 10-24.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.02

基于赋权-Topsis模型组合的梨树县耕地质量评价 及障碍因子分析

刘湘君¹ 刘长河¹ 徐圣贤¹ 刘冬^{1,2} 刘建东³ 乔冠宇¹ 周文涛¹ 黄元仿^{1*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院/农业农村部华北耕地保护重点实验室, 北京 100193;

2. 中化化肥有限公司, 北京 100069;

3. 长春市生态环境局榆树市分局, 吉林 榆树 130400)

摘要 为探究东北典型黑土区梨树县耕地质量情况,明确该地区影响耕地质量的障碍因子。基于耕地立地条件、剖面性状、理化性状、养分状况及管理条件构建梨树县耕地质量综合评价指标体系,为避免单一赋权方法的主观性或客观性偏差,运用反映专家经验的层次分析法(Antalytic Hierarchy Process)与依赖数据自身变异性的熵权法相结合,计算出更全面、更客观的指标综合权重,基于Topsis模型对2017—2021年县域耕地质量进行定量评价与时空分异解析,并引入障碍因子模型揭示指标的障碍度。结果表明:从时间维度看,研究区耕地质量等级结构呈现由中低向中高等级提升的态势,平均等级从2017年的2.97(以3~4等为主)提升至2021年的2.91(以2~3等为主),整体提升0.06个等级;从空间维度看,西南部区域出现质量退化而东北部及中部区域明显改善,质量提升区域面积所占比例高于质量下降区域;障碍因子分析表明,灌溉能力、土壤质地和地形部位构成核心障碍因子,次要障碍因子包括排水能力、pH、耕层厚度及有机质。综上,多维度指标融合与组合赋权方法可有效揭示耕地质量时空变化特征与障碍因子,为实施差异化耕地保育策略提供了科学依据。

关键词 梨树县; 耕地质量; 层次分析法; 熵权法; Topsis模型; 障碍因子模型

中图分类号 F301.2

文章编号 1007-4333(2025)10-0010-15

文献标志码 A

Cultivated land quality evaluation and obstacle factor analysis of Lishu County based on the weighting and Topsis model combination

LIU Xiangjun¹, LIU Changhe¹, XU Shengxian¹, LIU Dong^{1,2}, LIU Jiandong³, QIAO Guanyu¹,
ZHOU Wentao¹, HUANG Yuanfang^{1*}

(1. College of Land Science and Technology/Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Sinofert Holdings Limited, Beijing 100069, China;

3. Yushu Branch of Changchun Ecological Environment Bureau, Yushu 130400, China)

Abstract This study aimed to investigate the cultivated land quality and identify key obstacle factors in Lishu County, a typical black soil area of Northeast China. A comprehensive evaluation index system was established

收稿日期: 2025-06-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1500201)

第一作者: 刘湘君(ORCID:0009-0003-1545-1816),博士研究生,E-mail:lxj19990119@163.com

通讯作者: 黄元仿(ORCID:0000-0002-6706-0361),教授,主要从事数字农业与土壤过程量化研究,E-mail:yfhuang@cau.edu.cn

based on incorporating site conditions, profile characteristics, physicochemical properties, nutrient status, and management practices. To mitigate the bias of single-weighting methods, this study combined the experience-based Analytic Hierarchy Process with the data-driven entropy weight method to determine the indicators' weights more comprehensively and objectively. Subsequently, the Topsis model was used to quantitatively assess the spatiotemporal differentiation in cultivated land quality from 2017 to 2021, while an obstacle factor model was introduced to identify key limiting factors. The results indicate that: Temporally, the grade structure of cultivated land quality improved, shifting from predominantly low to medium grade to medium-to-high grade. The average grade improved from 2.97 (dominated by grades 3 to 4) in 2017 to 2.91 (dominated by grades 2 to 3) in 2021, representing an overall increase of 0.06. Spatially, a quality degradation was observed in the southwestern region, whereas the northeastern and central regions increased significantly. Notably, the area of improvement exceeded the area of decline. The results of obstacle factor analysis identified that irrigation capacity, soil texture, and terrain position were core limiting factors, and the secondary obstacles included drainage capability, pH, arable layer thickness, and organic matter content. In conclusion, the integration of multi-dimension indicators with a combined weighting method effectively reveals the spatiotemporal evolution and limiting factors of cultivated land quality and provides a scientific basis for implementing differentiated conservation strategies.

Keywords Lishu County; cultivated land quality; analytic hierarchy process; entropy weight method; Topsis model; obstacle factor model

保护和提升耕地质量对农业发展至关重要^[1-2]。

当前,我国耕地面临侵蚀、酸化、盐碱化、污染及占优补劣等问题,导致耕地质量下降^[3]。提高对耕地质量的认知是保障粮食安全与推动农业可持续发展的前提条件^[4]。推动耕地数量、质量、生态三位一体的保护工作,有助于转变耕地资源管理方式,提供技术支撑^[5]。

目前,已有耕地质量评价的方法较多。如:孔祥斌等^[6]构建了北京市大兴区耕地质量评价指标体系,并采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)对各评价指标的权重进行确定,同时对不同时期的农户行为的压力、状态、效应与响应指标进行了系统分析;孙守延等^[7]采用德尔菲法通过专家评估对候选指标进行赋值,随后构建层次分析模型以计算各指标的综合权重,德尔菲法在判断评价指标权重时,过于依赖专家主观判断,忽略了评价指标数据本身的离散程度而造成的差异性。林子聪等^[8]采用随机森林算法和相关性分析筛选定级指标并确认权重,该方法具有计算复杂、解释性差、对噪声敏感等缺点;叶云等^[9]构建了基于GA-BP(Genetic Algorithm-Back Propagation)神经网络的耕地质量评价方法,该方法对于训练样本的选择要求严格,选择不同样本对最终的评价结果有影响。此外,客观确定指标权重的方法如熵权法已被广泛应用到各种决策中,该方法完全基于数据,避免了主观因素的干扰,能客观反应各个指标在样本中的变异性;然而,该方法不能体现专家的经验,因

而会忽略指标的定性信息^[10]。

目前,AHP和熵权法组合赋权已被应用于生态环境效益和化工行业的综合评价^[11-13]。耕地质量评价常采用综合指数法^[14],而Topsis法则通过归一化矩阵确定最优解和最劣解,计算评价对象与最优解和最劣解之间的距离,得到其相对接近程度来最终评价耕地质量指数的优劣。Topsis法的优点在于对数据分布特征和指标数量没有严格要求,计算过程简便,适用于时间和空间纬度的评价,且具有较强的直观几何意义,能够充分利用原始数据,减少信息损失^[15-16]。因此,为克服单一评价方法的局限性,采用赋权-Topsis模型组合方法具有显著的必要性,该方法通过融合主客观赋权优势,既纳入专家经验,又利用数据客观规律,结合Topsis法具有对数据分布适应性强、计算高效且能最大限度保留原始信息的特点,可科学确定指标权重并提升评价结果可靠性。

梨树县是我国东北重要的粮食产区,其显著的粮食生产贡献和典型的黑土地特征,使其成为东北乃至全国重要农业区的典型代表。梨树县是“梨树模式”发源地与现代农业单元建设示范地^[17],体现新型农业耕作与现代化模式应用,兼具多种地形地貌及典型气候条件^[18],能代表不同自然条件下的耕地类型,且作为政策支持聚焦点与监测体系完备区域,可为耕地质量评价在政策实践、监测体系构建等多方面提供全面而典型的研究范例与经验借鉴。

尽管已有研究为耕地质量评价提供了多种方法,但仍存在一定的局限性;主观赋权法的结果易受专家经验的干扰而产生偏差,客观赋权法完全依赖数据自身的离散性,其权重结果可能与指标的现实重要性不符。因此,为克服单一赋权方法的局限性,并对东北典型黑土地的耕地质量进行更科学、精准的评价,本研究拟以东北典型黑土地梨树县为研究对象,采用AHP与熵权法相结合的组合赋权方法确定指标权重,并通过Topsis模型系统阐明梨树县耕地质量等级分布特征,并应用障碍因子分析模型识别出制约耕地质量提升的关键障碍因子,以期

为梨树县耕地资源的可持续管理和区域粮食安全保障提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

吉林省四平市梨树县位于 $123^{\circ}45' \sim 124^{\circ}53' E$, $43^{\circ}02' \sim 43^{\circ}46' N$,总面积为 $3\,511\text{ km}^2$ ^[19]。根据徐英德等^[20]将东北黑土地划分为6个类型区,梨树县位于东北黑土地六大类型区中的松嫩平原区,在松嫩平原的西南部和辽河平原的东北部,处于2个平原的过渡地带,详见图1。

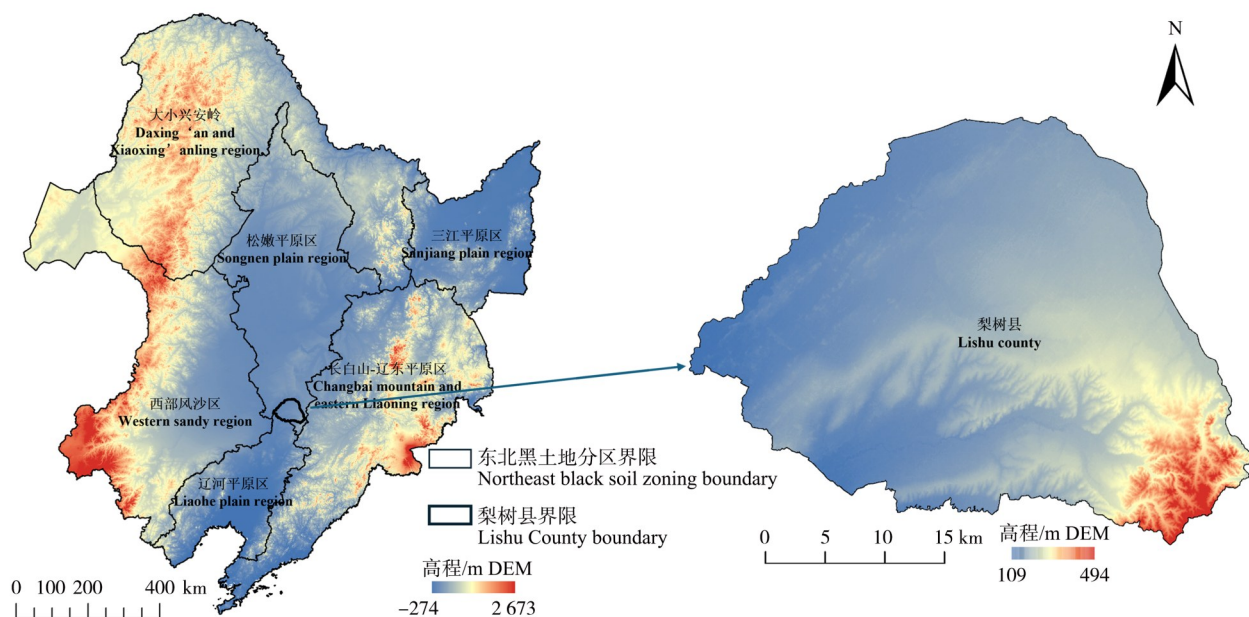


图1 梨树县地理位置示意图

Fig. 1 Schematic map of the location of Lishu County

1.2 数据来源及处理

本研究的数据来源于2017年和2021年梨树县的耕地质量调查与评价结果。为了综合考虑研究区内的土壤类型、地形特征等基础地理信息,采用了分层抽样与网格布点相结合的样点布设方法,并在耕地区域适当加密采样点。每个采样点均在0—20 cm的土层深度内随机选取5个点进行采样,随后使用四分法混合样品。采样过程中还收集了立地条件、土壤剖面特征、土地管理情况等相关资料,土壤pH、有机质、有效磷和容重等指标按照《土壤农化分析》^[21]标准进行测试分析。2017年梨树县的采样点总数为359个,2021年的采样点总数为400个(图2)。图件数据来源包括1:40 000的梨树县土地利用现状图、土壤类型图

和行政区划图。为了便于同一评价单元数据的对比,本研究使用了基于2017年耕地利用现状图、土壤类型图和行政区划图叠加标识生成的底图,共划分出371个评价单元。此方法的优势在于保证了同一评价单元内土地利用现状、土壤类型和行政区划的一致性,从而确保了耕地质量评价的准确性和便于耕地利用与管理。

为处理2年的采样数据,采用ArcGIS10.8的反距离权重插值法^[22]对有机质、pH和容重等定量指标进行了插值,生成了 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的栅格图。灌溉能力、排水能力等定性指标通过ArcGIS中的Spatial Join功能,按空间位置将采样点分布图与评价单元图进行属性关联,从而为每个评价单元赋

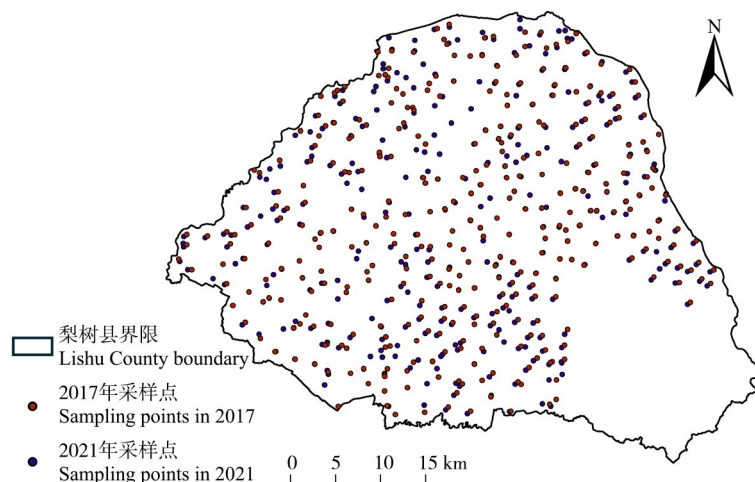


图 2 2017 年和 2021 年梨树县采样点分布图

Fig. 2 Distribution map of sampling points of Lishu County in 2017 and 2021

值。此外,为消除不同时期耕地图斑数量差异对耕地质量变化分析的影响,本研究将 2017 年和 2021 年的采样点数据统一赋值到 2017 年的耕地图斑,以更精确地反映同一耕地图斑在不同年份的耕地质量变化。其中:正值表示耕地质量等级提升;负值表示等级下降;0 则表示等级保持不变。

2 研究方法

2.1 耕地质量评价方法

2.1.1 评价指标选取

耕地质量受到多种因素的影响,进行耕地质量评价需要选择那些能够对耕地质量产生较大影响、稳定性较强且能准确反映耕地质量差异的因素,根据科学性原则、主导性原则、差异性原则、特色性原则、全面性原则选取指标^[23-24]。

根据 GB/T33469—2016《耕地质量等级》^[25]、《东北黑土区耕地质量评价》^[26],以耕地的作物生产功能为核心,遴选了符合梨树县耕地质量评价的指标,包括农田林网化、地形部位、有效土层厚度、耕层厚度、质地构型、容重、pH、质地、有机质、有效磷、排水能力和灌溉能力共 12 个。其中:农田林网化能降低风速,调节温度,增加大气湿度和土壤湿度;地形部位是影响耕地质量的重要因素之一,其高低起伏会对耕地的土地利用和土壤性质产生影响;有效土层厚度对作物根系生长有着重要作用,过浅的土层容易导致植物根系生长受限制,从而影响作物产量;耕层厚度影响根系生长发育,耕层过浅,作物无法扎根,不能充分吸收养分、水分等;质地、质地构

型代表着土壤的物理性状以及结构形态,决定了土壤保肥性;容重影响土壤渗透性和通气性,影响作物根系吸收养分、水分等;有机质、有效磷是评价耕地质量必选养分指标,已经被广泛使用,具有保肥供肥的作用;pH 影响着作物生长,pH 过高或者过低都会影响着耕地的环境;灌溉能力、排水能力的满足可以保证作物正常生长的需求,避免土壤过度的湿润以及水浸,保证土壤的通气性和肥力。

2.1.2 权重确定

为有效的避免人为因素以及数据本身离散程度所引起的误差,本研究采用层次分析法和熵权法相结合,确定评价指标的权重。

1)层次分析法。层次分析法是一种决策方法,将涉及决策的元素分解成不同层次,如目标、准则、方案等。该方法包括构建判断矩阵、构造比较矩阵、计算各指标权重以及进行一致性检验等步骤^[27]。

①构建判断矩阵。构建合理的结构层次模型是层次分析法中的最重要一步;

②构建比较矩阵。层次结构主要用于反映不同指标之间的逻辑关系,但是这些指标在整体评价中所占的重要性是不同的,设耕地质量为 X ,包括 n 个指标,为 $X=[X_1, X_2, \dots, X_n]$,将各个指标进行两两比较,采用 1~9 标度衡量 a_{ij} 的值, a_{ij} 代表某个指标对另一指标的重要程度;

③计算各指标权重。通过指标间比较得出的 a_{ij} 值,求解其特征向量 W 为各个指标的权重,并求出其最大特征值 $\lambda_{\max}$;

④判断矩阵的一致性检验。具体公式如下：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中：CI为一致性， n 为比较矩阵的阶，也是指标的个数。CR为一致性比例；RI为随机一致性指标值。如果 $CR < 0.1$ ，则通过判断矩阵一致性检验，否则对判断矩阵进行修正。

2)熵权法。熵权法的基本原理是基于各指标的变异程度来确定其客观权重。指标的变异性越大，说明其信息量越丰富，对耕地质量评价的区分作用越强，因而赋予的权重越高；反之，变异性越小的信息贡献也较弱，权重相应较低。具体过程主要包括以下步骤^[28]：

①构建评价指标矩阵，有 m 个指标， n 个指标数据值。具体公式如下：

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

②由于各个指标的量纲不同，因此对于指标数据进行无量纲化处理，本研究采用归一化处理，该方法优势在于将各个指标数据值标准化在 $[0,1]$ ，具体公式如下：

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}(X_{ij})}{\text{Max}(X_{ij}) - \text{Min}(X_{ij})} \quad (4)$$

式中： X'_{ij} 为指标标准化后的数据， X'_{ij} 为第 i 个评价单元的第 j 个值； $\text{Max}(X_{ij})$ 、 $\text{Min}(X_{ij})$ 分别为指标的最大值和最小值。指标采用式(4)处理；区间型指标是先根据GB/T 33469—2016《耕地质量等级》^[25]确定其分级，代入到式(4)中。

③计算第 i 个评价单元的第 j 项指标的比重 p_{ij} 。具体公式如下：

$$p_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad i=1,2,\dots,m; \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

④确定各个指标的信息熵。根据信息论中信息熵的定义，计算数据的信息熵：

$$E_i = -\ln(m)^{-1} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad 0 \leq p_{ij} \leq 1 \quad (6)$$

式中： E_i 为第 i 个指标的信息熵。

⑤确定各指标权重。根据信息熵所计算得出的，各个指标的信息熵为 $E_1, E_2, \dots, E_n$ ，进而计算指标权重：

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n 1 - E_j} \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中： W_j 为各项评价指标的权重。

3)组合权重法。

为了综合考虑层次分析法和熵权法所计算出的权重，运用线性组合法计算组合权重，为去除较大数据干扰影响，引入距离函数^[29-30](式(8))，通过式(9)计算出权重分配系数 α 与 β ；将 α, β 通过式(10)得出各评价指标的组合权重：

$$d(W_1, W_2) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W_1 - W_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} d(W_1, W_2)^2 = (\alpha - \beta)^2 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$W_3 = \alpha W_1 + \beta W_2 \quad (10)$$

式中： W_1, W_2, W_3 分别为层次分析法确定的指标权重、熵权法确定的指标权重以及组合权重； α 和 β 分别为权重分配系数。

农田林网化、地形部位、有效土层厚度、耕层厚度、质地构型、容重、pH、质地、有机质、有效磷、排水能力和灌溉能力在耕地质量评价体系中的权重分别为0.05、0.11、0.07、0.07、0.05、0.05、0.09、0.11、0.07、0.06、0.10和0.18。详见表1。

2.1.3 Topsis模型

Topsis模型主要步骤包括^[31]：

1)首先将原始数据标准化处理后的结果，构建一个加权矩阵：

$$Z_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m (X'_{ij})^2} \quad (11)$$

式中： Z_{ij} 为加权规范化矩阵； X'_{ij} 为第 i 个评价单元的第 j 个指标的值。

2)其次确定各项指标的最优解 E_j^+ 与最劣解 E_j^- ，并计算各个评价指标到最优、劣解的加权欧式距离 D_i^+, D_i^- 。具体计算公式如下：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n W_j (X_{ij} - E_j^+)^2} \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n W_j (X_{ij} - E_j^-)^2} \quad (13)$$

式中： D_i^+ 为第 i 个评价单元与最优解的距离； D_i^- 为第 i 个评价单元与最劣解的距离； W_j 为第 j 个评价指标的权重； E_j^+ 为第 j 个评价指标的最大分值； E_j^- 为第 j 个评价指标的最小分值。

表 1 梨树县耕地评价指标权重
Table 1 Weights of cultivated land evaluation index of Lishu County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	权重 Weight		
			层次分析法 AHP	熵权法 Entropy weight method	组合法 Combination weight
梨树县耕地质量 Cultivated land quality in Lishu County	立地条件(C1) Site condition	农田林网化(C11) Degree of field forest network	0.08	0.02	0.05
		地形部位(C12) Terrain position	0.12	0.08	0.11
	剖面性状(C2) Profile characteristics	有效土层厚度(C21) Effective soil layer thickness	0.10	0.03	0.07
		耕层厚度(C22) Arable layer thickness	0.07	0.07	0.07
		质地构型(C23) Texture configuration	0.08	0.01	0.05
	耕层理化性状(C3) Arable layer physical and chemical properties	容重(C31) Soil bulk density	0.05	0.05	0.05
		pH(C32)	0.08	0.10	0.09
		质地(C33) Arable layer texture	0.09	0.11	0.11
	养分状况(C4) Nutrient status	有机质(C41) Soil organic matter	0.08	0.05	0.07
		有效磷(C42) Available P	0.06	0.06	0.06
	管理条件(C5) Manage conditions	排水能力(C51) Drainage capability	0.07	0.15	0.10
		灌溉能力(C52) Irrigation capacity	0.13	0.26	0.18

3)每个评价单元到最优解的贴进度计算即耕地质量指数。具体计算公式如下：

$$C_i^+=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-}$$

(14)

式中： C_i^+ 为第*i*个评价单元的耕地质量指数,值越大说明该评价单元的耕地质量越高。GB/T 33469—2016《耕地质量等级》^[25]中将耕地质量分为 10 个等级,由于本研究尺度为县域尺度,耕地质量指数相差较小,因此利用相等间距法^[32]将耕地质量分为 5 个等级。

在计算出梨树县各个评价单元耕地质量等级的条件下,采用面积加权法,计算梨树县平均耕地

质量等级。具体计算公式如下：

$$AC=\frac{\sum C\times A}{SA}$$

(15)

式中:AC为研究区平均耕地质量等级;*C*为评价单元耕地质量等级;*A*为每个评价单元的面积;SA为研究区耕地总面积。

2.2 障碍因子分析模型

明确研究区耕地质量的限制因素,并采取针对性的措施加以改善或消除,对于提升耕地质量具有重要的实践意义。本研究使用障碍因子模型^[33]对梨树县耕地质量评价指标进行分析,首先根据式(16)计算 P_{ij} ;然后计算指标的障碍度 M_{ij} ;最后经式

(18)计算指标平均障碍度 M_j 。

$$P_{ij} = 1 - N_{ij} \tag{16}$$

$$M_{ij} = \frac{P_{ij}W_j}{\sum_{j=1}^n P_{ij}W_j} \tag{17}$$

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^m M_{ij}}{n} \tag{18}$$

式中： M_{ij} 为第*i*个评价单元的第*j*个指标的障碍度， M_j 为第*j*个指标的平均障碍度，其数值越大表示该因子的障碍性越强； P_{ij} 为指标与最大目标之间的差距，可以通过计算指标标准化值与1之间的差距来表示； N_{ij} 为第*i*个评价单元的第*j*个指标的标准化值； W_j 为指标的权重。根据相关研究^[7,34]将评价单元的指标障碍度划分为4个级别：无障碍(0)、轻度障碍(0~10%)、中度障碍(10%~20%)和重度障碍(>20%)。

3 结果与分析

3.1 耕地质量评价结果

2017年和2021年梨树县耕地质量等级面积所占比例结果见表2。2017年耕地质量统计如下：面积最大的是3等地，面积为1 225.01 km²，占耕地总

面积的39.90%，3等的耕地主要分布在梨树县的中部和北部，同时在东南部也有少量分布；面积最小的是5等地，仅为111.50 km²，占耕地总面积的3.63%。该等级的耕地主要集中在梨树县的中部和西部地区，表明这些区域的耕地质量较差；2等地的面积为611.22 km²，占耕地总面积的19.91%，分布在梨树县北部地区；1等地面积较少，为272.69 km²，占比为8.88%，主要分布在梨树县西南地区和北部地区。2021年耕地质量统计如下：相较于2017年的评价数据，梨树县的耕地质量仍表现出明显差异。2021年，3等地的耕地面积最大，达到1376.09 km²，占总耕地面积的44.82%。这一等级的耕地主要分布在梨树县的西部和南部地区，显示出该区域的耕地质量相对较好。而面积最小的是1等地，仅为51.61 km²，占总耕地面积的1.68%，这种高质量耕地主要集中在梨树县的东北部区域。其中，2等地面积占比较高，为30.95%，集中分布在县域东北部；4等地面积为615.79 km²，占比达20.06%。在梨树县西北、东南地区分布较多；5等地面积较少，占比为2.49%，主要分布在梨树县西北地区。通过式(15)对2017年和2021年梨树县耕地质量等级分别进行面积加权计算，得到最终的结果为2.97和2.91(表2)。

表2 梨树县2017年和2021年耕地质量等级面积及所占比例

Table 2 The area and proportion of cultivated land quality grade of Lishu County in 2017 and 2021

耕地质量等级 Cultivated land quality grade	2017 年		2021 年	
	面积/km ² Area	比例/% Percentage	面积/km ² Area	比例/% Percentage
1等 1st grade	272.69	8.88	51.61	1.68
2等 2nd grade	611.22	19.91	950.16	30.95
3等 3rd grade	1 225.01	39.90	1 376.09	44.82
4等 4th grade	849.60	27.67	615.79	20.06
5等 5th grade	111.50	3.63	76.37	2.49
平均质量等级 Average quality grade	2.97		2.91	

2017年梨树县耕地质量空间分布情况见图3(a)。可见梨树县主要是中高等级耕地。其中，2等和3等地是分布最广的类型，遍布于县域的中部、东部和北部。1等地则呈现出斑块状分布，主要集中于梨树县的北部以及西南区域。质量相对较低的

4等和5等地则主要分布在梨树县的西部和东南部地区，形成小范围的集中区。从梨树县耕地质量空间分布图见图3(b)。可见：耕地质量的空间分布格局发生了细微变化，但梨树县耕地质量依旧以中高等级为主，仅有少部分地区的耕地质量等级低。1等地和

2等地在空间上更为集中,尤其是在梨树县的东北部和中部,形成了较大面积的连片优质区。3等地仍然

是构成梨树县耕地主体的基础等级,广泛分布。与此同时,4等地和5等地在空间上的分布则更为收缩。

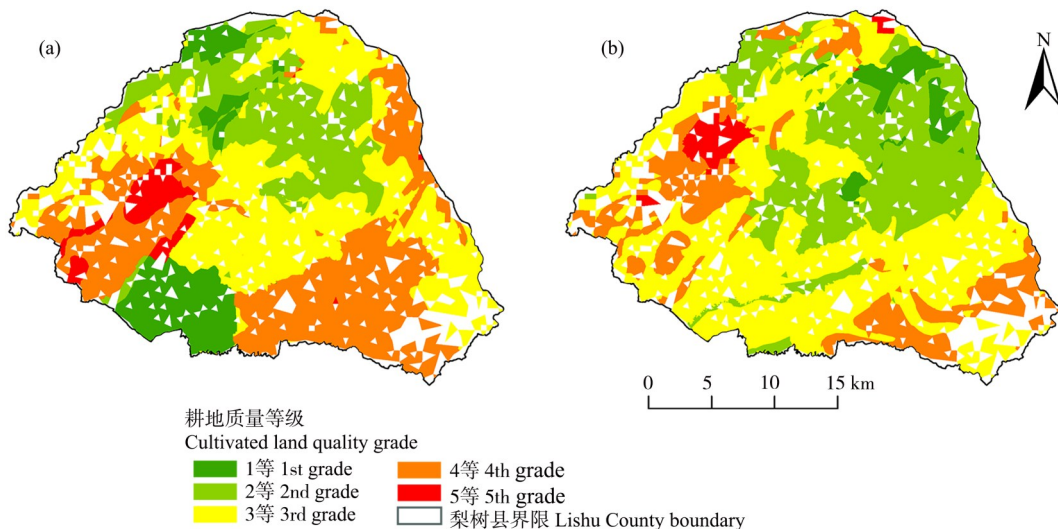


图3 2017年(a)和2021年(b)梨树县耕地质量等级空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of cultivated land quality grade of Lishu County in 2017 (a) and 2021 (b)

3.2 耕地质量等级变化分析

梨树县2017年和2021年耕地不同质量等级面积变化结果见表3。可见:结合前文提到的2017年和2021年梨树县耕地质量的情况,可以看出梨树县在2017年和2021年的耕地质量之间存在明显的差异。梨树县2021年2等地和3等地相较于2017年面积是增长的,分别增长了338.94、151.08 km²;而1等地、4等地和5等地面积是减少

的,分别减少了221.08、233.81、35.12 km²;整体看梨树县高等级地和低等级地明显减少,但中高等级地面积是增加的,其中2等地涨幅最大,增长了11.04%,而3等地涨幅较小,增长了4.92%,所以梨树县耕地等级主要是由低等转为高等,梨树县的耕地质量水平在2021年相较于2017年平均提升了0.06个等级,这意味着该地区的耕地质量有所改善。

表3 梨树县2017年和2021年耕地不同质量等级面积变化

Table 3 Changes in the area of different cultivated land quality grades of Lishu County from 2017 to 2021

指标 Index	1等 1st grade	2等 2nd grade	3等 3rd grade	4等 4th grade	5等 5th grade
面积变化量/km ² Area change amount	-221.08	338.94	151.08	-233.81	-35.12
变化百分比/% Change percentage	-7.20	11.04	4.92	-7.62	-1.14

比较2017年和2021年的耕地质量等级图,以获取对耕地质量变化的全面了解。2021年耕地质量空间分布图中高等级地区占比明显高于2017年,主要体现在东北地区,并且橘色以及红色所代表的耕地质量低等地区明显减少,表明梨树县2017—2021年耕地质量得到提升。为了详细分析梨树县

每个评价单元的耕地质量等级变化,并了解梨树县内各耕地等级变化的分布情况,我们可以进行详细的数据分析和研究。这样可以更好地了解每个评价单元的耕地质量等级的变化趋势,并对梨树县内不同耕地等级的分布情况做出具体判断。

利用 ArcGIS 对 2021 年与 2017 年耕地质量等

级空间分布图进行等级变化分析,可见2017—2021年梨树县评价单元的耕地质量等级变化比较明显,等级变化主要集中-2—2(不包括0),计算得到梨树县2017年至2021年耕地质量等级变化的详细面积与占比见表4。可见研究区内耕地质量保持

表4 梨树县耕地质量等级面积变化及所占比例
Table 4 Change area and proportion of cultivated land quality grade in Lishu County

等级变化 Grade change	面积/km ² Area	所占比例/% Proportion
-3	8.20	0.27
-2	315.94	10.29
-1	404.56	13.18
0	1 181.73	38.49
1	990.64	32.27
2	167.64	5.46
3	1.32	0.04

注:正值代表等级提升;负值代表等级下降;0代表等级不变。下同。
Note: Positive value represents grade increase, negative value represents grade decrease, and 0 represents grade unchanged. The same below.

不变的区域面积最大,达到了1 181.73 km²,占总面积的38.49%。在发生变化的耕地中,质量得到提升的总面积(1 159.6 km²)显著高于质量下降的总面积(728.7 km²),表明整体态势向好。具体来看:提升一个等级是耕地质量变化最主要的形式,其面积高达990.64 km²,占比为32.27%;其次是下

降1个等级和下降2个等级的区域,面积分别为404.56和315.94 km²;质量提升2个等级的面积达到了167.64 km²;变化幅度达到3个等级的区域(无论提升或下降)总面积极小,合计不足10 km²,占比仅为0.31%。总体而言,梨树县耕地质量在2017—2021年是以稳定和提升1个等级为主的积极变化趋势。

梨树县耕地质量等级变化的空间分布见图4。可见提升1个等级的耕地,主要分布在梨树县的中部地区以及东北地区。主要因为耕地pH略微升高,障碍度降低,可能与耕地合理施用有机肥和选择合适的作物秸秆进行还田有效地提高土壤缓冲能力,缓解酸化有关系^[34],并且与以往研究^[35]梨树县pH偏中性结论一致。耕地质量等级降低1个等级分布在梨树县的西北部 and 东南部(图4)。耕地质量降低2个等级主要分布在梨树县西南地区以及中北部。主要原因为:长期不深耕深松和机械耕作碾压、践踏,使耕地土壤耕层变浅,土壤养分有效性和作物营养状况恶化^[36];该地区的水利设施建设年代久远,造成耕地灌溉能力日趋低下,耕地质量得不到保障,在干旱或洪涝时期对耕地的影响更为明显。耕地质量提升2个等级仅在梨树县的中部部分地区分布(图4)。梨树县耕地质量等级是以不变化为主,广泛地分布于全县。综合来看梨树县提升的耕地质量等级面积要高于下降的耕地质量等级面积,反映了2017年和2021年梨树县整体的耕地质量是基本保持不变、略微提升的情况,主要为中部和东西两侧的耕地质量升高。

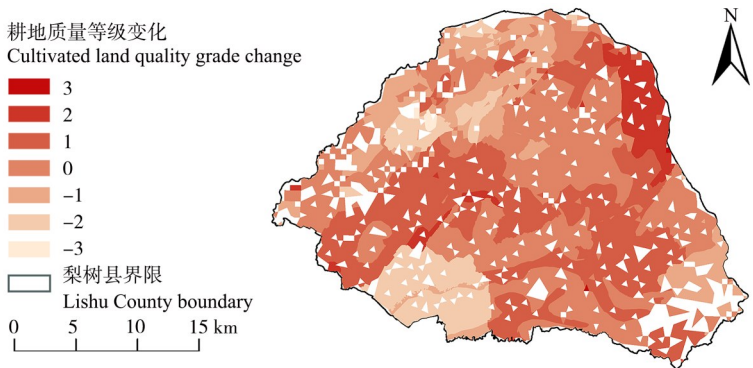


图4 梨树县耕地质量等级变化分布图

Fig.4 The grading change distribution map of cultivated land quality of Lishu County

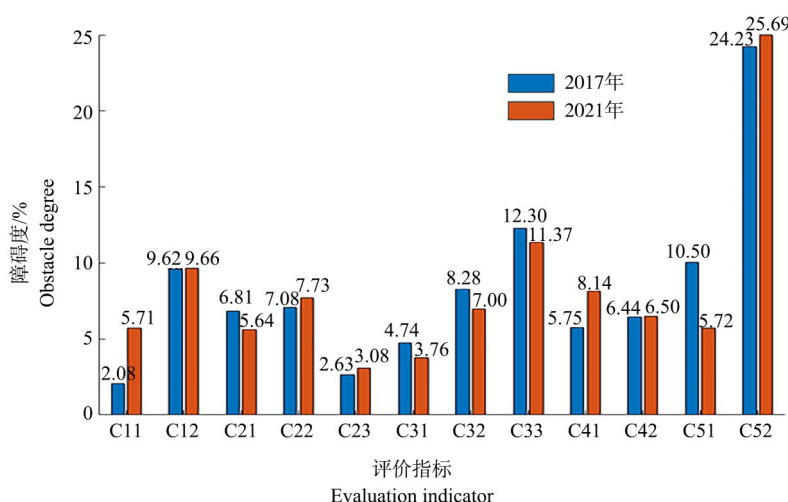
3.3 耕地障碍因子分析

2017年和2021年梨树县影响耕地质量的障

碍因子结果见图5。可见:2017年耕地质量主要的障碍因子为灌溉能力、质地、排水能力、地形部

位和 pH; 2021 年主要障碍因子为灌溉能力、质地、地形部位、有机质和耕层厚度。2017 年和 2021 年均存在障碍因子为灌溉能力、质地、地形部位。其中: 质地与地形部位为自然因素, 不易于改良且随时间变化较小; 灌溉能力 2 期障碍度

均 $>20\%$, 属重度障碍, 是梨树县耕地质量评价的第一障碍因素, 这与梨树县地理位置有关, 其地处我国东北地区, 气候寒冷干燥, 降水较少。因此, 灌溉能力障碍度在 2 期数据中有所增加, 说明灌溉能力对耕地质量的限制性增加。



C11、C12、C21、C22、C23、C31、C32、C33、C41、C42、C51 和 C52 分别代表农田林网化、地形部位、有效土层厚度、耕层厚度、质地构型、容重、pH、质地、有机质、有效磷、排水能力和灌溉能力。下同。

C11, C12, C21, C22, C23, C31, C32, C33, C41, C42, C51 and C52 represent the degree of field forest network, terrain position, effective soil layer thickness, arable layer thickness, texture configuration, soil bulk density, pH, arable layer texture, soil organic matter, available P, drainage capability, irrigation capacity. The same below.

图 5 梨树县耕地质量评价指标障碍度

Fig. 5 Obstacle degree of cultivated land quality evaluation indicators of Lishu County

2017 年梨树县耕地质量评价指标障碍度面积占比见图 6。可见 2017 年梨树县耕地质量评价指标的障碍度特征表现出明显差异。其中: 在重度障碍方面, 灌溉能力是主要障碍因子, 其中灌溉能力的重度障碍面积占比最高, 达到 90%, 而其他指标则未表现出明显的重度障碍; 在中度障碍的分布上, 质地、排水能力、pH、地形部位等指标的耕地面积表现出不同程度的限制效应, 尤其是质地和排水能力, 中度障碍的面积占比分别为 84.23% 和 61.09%; 轻度障碍的耕地面积主要集中在农田林网化、质地构型、容重等指标, 且农田林网化、容重、有机质、有效磷、质地构型和有效土层厚度的轻度障碍面积占比均超过 90%。

2021 年梨树县耕地质量评价指标障碍度面积占比见图 7。可见 2021 年梨树县的耕地质量评价指标障碍特征有所变化。其中: 重度障碍指标的耕地面积依旧集中在灌溉能力, 其中灌溉能力的重度障碍面积占比仍然占据主导地位, 达到 94.58%; 在中

度障碍方面, 质地、地形部位、pH 和有机质等指标的耕地表现出较为明显的影响, 其中质地的中度障碍面积占比最高, 为 80.31%; 在轻度障碍方面, 质地构型、有效土层厚度、容重等指标的耕地面积占比均较大, 且农田林网化、容重、有效磷、质地构型和有效土层厚度的轻度障碍面积占比也普遍超过 90%。

对 2017 年和 2021 年主要指标障碍度变化情况进行具体分析发现(图 6 和图 7): 灌溉能力是梨树县耕地质量的主要障碍因子, 这 2 年梨树县耕地质量评价指标障碍度数据中灌溉能力重度障碍耕地面积占比由 90.16% 增加至 94.58%, 灌溉能力限制耕地质量提升的最主要因素; 2017—2021 年排水能力的障碍度下降 4.32%, 中度障碍和无障碍耕地面积增加幅度是所有指标最大的; 耕地排水能力的增强在全县各地区都有体现, 对于梨树县耕地质量限制性下降较多, 使得耕地质量在 2021 年相较于 2017 年有所提升, 表明排水能力对于梨树县耕地质量提

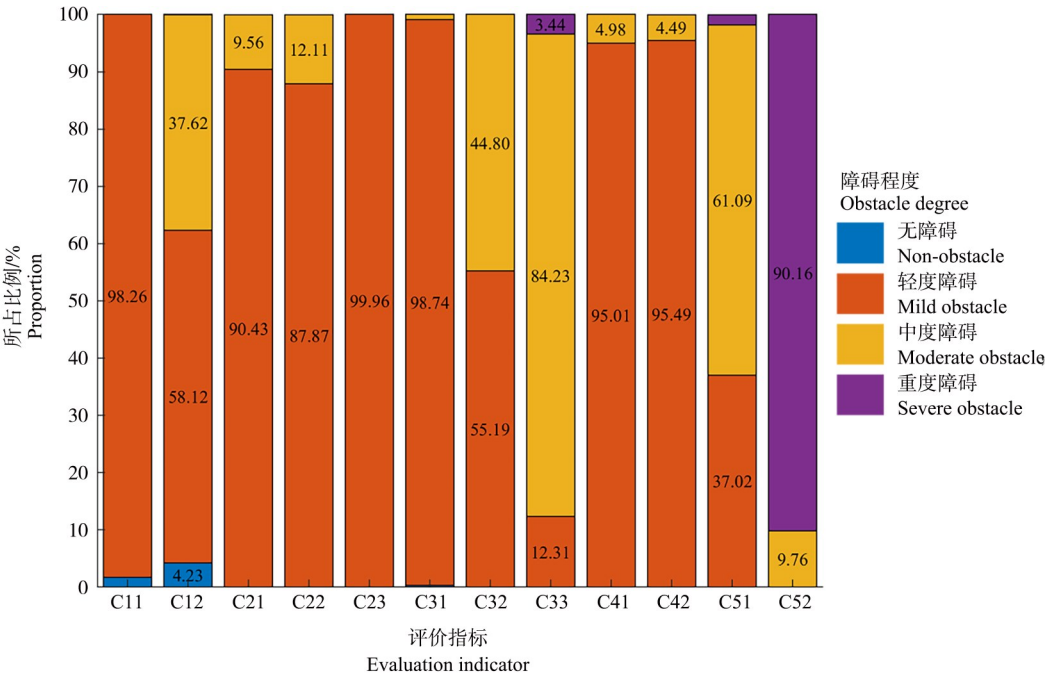


图6 2017年梨树县不同指标障碍度面积占比

Fig. 6 Proportion of obstacle areas with different indicators in Lishu County in 2017

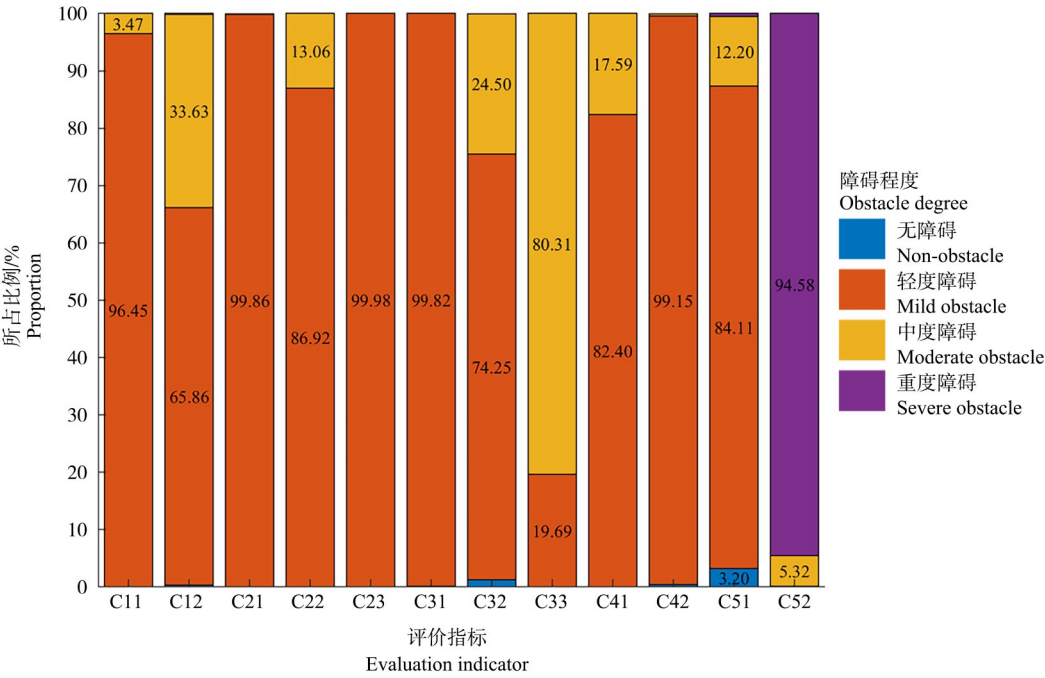


图7 2021年梨树县不同指标障碍度面积占比

Fig.7 Obstacle degree area and proportion of different indicators of Lishu County in 2021

升有一定的作用;pH在2年数据中都未出现重度障碍,但在2021年中度障碍耕地面积减少了623.00 km²,轻度障碍耕地增加了585.12 km²,无障碍耕地增加了37.87 km²。此外,耕层厚度各障碍度耕地面积大小变化较小,2021年有机质中度障碍耕

地面积增加了386.97 km²,轻度障碍耕地面积减少了387.01 km²,这导致有机质障碍度在2021年相较于2017年增加了2.39%,耕地有机质含量降低,导致障碍度增加,其他障碍度指标均无较大程度变化,对于耕地质量限制性较低,对耕地质量提升作

用也并不明显。总体而言：灌溉能力和排水能力在2017年和2021年均表现出较为明显的限制效应，尤其是在重度障碍和中度障碍的耕地面积占比方面；质地、有效土层厚度、容重等指标在2017—2021年中轻度障碍和中度障碍面积占比均较高，表明这些因子仍然是影响梨树县耕地质量提升的主要障碍。

4 讨论

本研究对比不同赋权方法在耕地质量评价指标权重的确定上的结果可以发现，各指标的权重存在显著差异，这深刻反映了主观专家认知与客观数据特征之间的异同。具体而言，灌溉能力与排水能力在AHP法中分别获得了0.13和0.07的较高权重，体现了灌排措施对农业生产的重要性。然而在熵权法中，这2个指标的权重急剧升高至0.26和0.15，远超其他指标。这种现象并非源于“数值问题”，而是熵权法对研究区数据内在特征的客观反映。熵权法的核心在于，指标数据在各评价单元间的离散程度越大，其所含信息量越多，权重也应越高。梨树县农业生产模式很大程度上对自然降水依赖度高，导致农田水利设施水平呈现出2级分化的格局，即多数地区设施差，而少数地区则设施优。将这种定性的“优、良、差”等级转化为定量数值后，便形成了方差极大的数据结构。熵权法检测到了这一高离散度，因此客观地赋予了灌排能力最高的权重，这有力地证明了灌排能力是当前造成梨树县耕地质量空间分异的主要限制因子。综上，本研究结合主、客观方法，既避免了传统AHP法依赖专家经验的主观偏差问题，同时也克服了熵权法对数据敏感性和定性指标量化的局限性，最终得到的组合权重更为均衡可靠，最终确定的各指标权重也与东北黑土区耕地质量评价的已有研究结果一致^[32]，为评价结果的科学性提供了保障。

与已有研究相比^[7-9]，本研究采用Topsis模型进行综合评价，其优势在于能够处理多维度、多指标的复杂系统，计算简便且综合性强。本研究结果表明，2017—2021年，梨树县的耕地质量空间格局发生了明显的动态变化，高质量耕地呈现出向东北部集中的趋势，而西部地区则持续为耕地质量低等地。主要是因为梨树县西部地区的土壤类型是风沙土，而风沙土具有偏干旱、土壤黏粒少、沙性大、有机质缺乏等特点，生态环境脆弱^[37]。2021年梨树

县耕地质量等级较2017年提升了0.06个等级，整体呈现稳定提升趋势，这与姚东恒等^[32]东北黑土区大尺度范围的研究结论一致。然而，区域差异明显，东北部耕地质量明显改善，而西南部则出现下降，主要归因于有机质含量的降低。有机质作为耕地质量的核心指标，其变化对土壤结构和养分供应具有重要影响^[38]。此外，灌溉能力、质地和地形部位是2017年与2021年共同的主要障碍因素。其中，灌溉能力的限制性最为突出，这与张立江等^[34]的研究结果一致。针对梨树县灌溉能力不足、土壤质地不佳、耕层厚度薄等限制问题，本研究建议通过秸秆还田、增施有机肥和深耕改土等技术提升土壤有机质含量，同时加强灌溉设施建设与水资源优化配置，以缓解灌溉能力对耕地质量的制约^[39-40]。梨树县耕地质量的改善与“梨树模式”^[41]、《东北黑土地保护规划纲要》^[42]及后续政策的实施密切相关，特别是2020年《东北黑土地保护性耕作行动计划》^[43]的推行，为土壤质量的提升提供了技术支撑。“梨树模式”作为一种先进的保护性耕作体系，其核心在于秸秆覆盖还田与免耕播种，该模式的实施对耕地质量产生了重要影响，秸秆覆盖和免耕作业有效减少了水土流失，改善了土壤结构和保水能力。同时，定期的深松作业打破了犁底层，增加了耕层深度，共同促成了耕地质量的整体提升^[41]。然而，政策的长期性与持续性仍需加强，特别是在西南部等耕地质量下降区域，需因地制宜地推广保护性耕作、轮作休耕等技术，并结合区域特点制定差异化管理措施。

本研究通过障碍因子模型分析了梨树县耕地质量的主要障碍因素，发现灌溉能力、质地和地形部位是持续性的限制因素。然而，障碍因子模型通常基于静态数据分析，难以反映系统内部因素随时间的动态变化，未来研究可引入动态障碍因子分析框架，结合时序数据与机器学习方法，捕捉障碍因子的变化规律，提升综合评价结果的动态适应性和精度。

本研究基于2期数据对梨树县耕地质量进行了时空变化分析，但仍存在一定局限性。具体内容如下：Topsis模型对指标独立性的假设可能影响结果的准确性，未来研究可进一步探索模糊AHP、灰色系统理论或网络分析方法，以增强权重赋值的科学性和对复杂系统非线性关系的处理能力；障碍因子

模型的静态性限制了其对复杂系统的动态适应性,未来研究可进一步整合多源数据,优化权重赋值方法,以提升耕地质量评价的科学性和实用性;同时,应建立长期监测机制,加强对耕地质量核心指标的动态监测和管理,为黑土地保护与农业可持续发展提供更精准的决策依据。

5 结 论

为科学综合地评价典型黑土区梨树县的耕地质量情况,本研究基于GB/T 33469—2016《耕地质量等级》和《东北黑土区耕地质量评价》,系统分析了2017年与2021年梨树县耕地质量等级的空间分布、变化特征及障碍因子。主要结论如下:

1)基于AHP—熵权法对梨树县耕地质量评价指标确定综合权重,其中灌溉能力和排水能力表现出较高的权重;引入Topsis模型对梨树县耕地质量进行评价,梨树县耕地质量均以中高等级为主。

2)梨树县耕地质量等级从2017年的平均2.97提升至2021年的2.91,整体呈现基本稳定、略微提升的趋势,其中东北部区域耕地质量显著改善,而西南部区域则出现一定程度的下降。耕地质量等级提升的面积高于下降面积,反映了黑土地保护政策的实施对区域耕地质量的积极影响。

3)从障碍因子来看,2017年与2021年灌溉能力、质地和地形部位是制约梨树县耕地质量的主要障碍因子,其中灌溉能力的限制性最为突出。此外,2021年有机质和耕层厚度成为新的障碍因素,表明土壤肥力与结构问题仍需进一步关注。

综上,尽管梨树县耕地质量整体呈现改善趋势,但区域差异和障碍因素的持续性提示黑土地保护仍需针对性地解决灌溉能力不足和土壤质地改良等问题。未来,应进一步加强黑土地保护的科技支撑,完善政策激励机制,推广保护性耕作、秸秆还田等技术措施,同时注重区域差异化管理,推动黑土地保护与农业可持续发展的深度融合,为实现东北黑土地耕地质量的长期稳定提升提供科学依据和实践参考。

参考文献 References

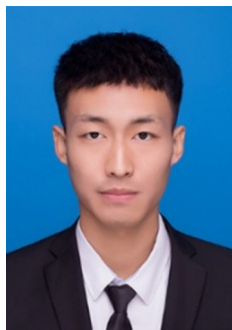
- [1] 沈仁芳,陈美军,孔祥斌,李永涛,同延安,汪景宽,李涛,鲁明星. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1210-1217
Shen R F, Chen M J, Kong X B, Li Y T, Tong Y A, Wang J K, Li T, Lu M X. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for

- its management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1210-1217 (in Chinese)
- [2] 刘友兆,马欣,徐茂. 耕地质量预警[J]. 中国土地科学, 2003, 17(6): 9-12
Liu Y Z, Ma X, Xu M. Preliminary study on the early warning of cultivated land quality[J]. *China Land Science*, 2003, 17(6): 9-12 (in Chinese)
- [3] 徐明岗,卢昌艾,张文菊,李玲,段英华. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 8-14
Xu M G, Lu C A, Zhang W J, Li L, Duan Y H. Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(7): 8-14 (in Chinese)
- [4] 杜国明,刘彦随,于凤荣,刘美,郑惠玉. 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 G M, Liu Y S, Yu F R, Liu M, Zheng H Y. Evolution of concepts of cultivated land quality and recognition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 243-249 (in Chinese)
- [5] 张超,乔敏,鄢文聚,刘佳佳,朱德海,杨建宇. 耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 1-6
Zhang C, Qiao M, Yun W J, Liu J J, Zhu D H, Yang J Y. Trinity comprehensive regulatory system about quantity, quality and ecology of cultivated land [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 1-6 (in Chinese)
- [6] 孔祥斌,刘灵伟,秦静. 基于农户土地利用行为的北京大兴区耕地质量评价[J]. 地理学报, 2008, 63(8): 856-868
Kong X B, Liu L W, Qin J. Arable land evaluation based on the household land use behavior in Daxing District of Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(8): 856-868 (in Chinese)
- [7] 孙守延,裴久渤,汪景宽,徐志强,戴继光. 下辽河平原区耕地质量演变及障碍因素诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(11): 92-102
Sun S Y, Pei J B, Wang J K, Xu Z Q, Dai J G. Cultivated quality evolution and obstacle factors diagnosis in the lower Liaohe river plain [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(11): 92-102 (in Chinese)
- [8] 林子聪,任向宁,朱阿兴,赵鑫,胡月明. 基于随机森林算法的耕地质量定级指标体系研究[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 38-48
Lin Z C, Ren X N, Zhu A X, Zhao X, Hu Y M. Research on the index system of cultivated land quality grading based on random forest algorithm [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41(4): 38-48 (in Chinese)
- [9] 叶云,赵小娟,胡月明. 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 Y, Zhao X J, Hu Y M. 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)
- [10] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-556
Zou Z H, Sun J N, Ren G P. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 552-556 (in Chinese)
- [11] 余奋霞,李虹,马俊花,贺婧. 基于AHP-熵权法的全生物降解地膜综合效益评价[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(2): 176-188
Yu F X, Li H, Ma J H, He J. Evaluation of the comprehensive benefit of biodegradable mulch based on AHP-entropy weight method [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(2): 176-188 (in Chinese)
- [12] 赵思勋,赵晨羽,姜妮,曾思育. 基于AHP-熵权法的滇池环湖湿地效益评估研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(4): 411-420
Zhao S J, Zhao C Y, Zeng N, Zeng S Y. Benefit evaluation and optimization strategy of wetland around Dianchi Lake based on AHP-entropy weight

- method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(4): 411-420 (in Chinese)
- [13] 张亚青, 王相, 孟凡荣, 张文睿, 焦甜甜, 张华伟, 梁鹏. 基于熵权和层次分析法的 VOCs 处理技术综合评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2946-2955
Zhang Y Q, Wang X, Meng F R, Zhang W R, Jiao T T, Zhang H W, Liang P. Comprehensive evaluation of VOCs processing technology based on entropy weight method and analytic hierarchy process [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(6): 2946-2955 (in Chinese)
- [14] 陈朝, 吕昌河. 基于综合指数的湖北省耕地质量变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2018-2029
Chen Z, Lü C H. An analysis on the variation of farmland quality using an integrated index approach in Hubei Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2018-2029 (in Chinese)
- [15] 姜芸, 王军, 滕浩, 李浩林. 基于 TOPSIS 模型的典型黑土区耕地质量评价及土壤侵蚀耦合协调分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 82-94
Jiang Y, Wang J, Teng H, Li H L. Coupling coordination analysis of the quality evaluation of cultivated land and soil erosion in typical black soil areas using TOPSIS method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(12): 82-94 (in Chinese)
- [16] 雷勋平, 邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1): 314-323
Lei X P, Qiu G H. Empirical study about the carrying capacity evaluation of regional resources and environment based on entropy-weight TOPSIS model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 314-323 (in Chinese)
- [17] 关义新. 东北黑土保护与利用的“梨树模式”[J]. 中国农村科技, 2021, (4): 18-21
Guan Y X. The “Pear tree Model” for protection and utilization of black soil in Northeast China [J]. *China Rural Science & Technology*, 2021, (4): 18-21 (in Chinese)
- [18] 刘航, 李瑞红, 李胜荣, 侯红星, 秦天, 高远, 周业泽, 李明军. 松辽平原典型黑土区不同土壤结构的古气候背景与黑土成因机制[J]. 地质通报, 2024, 43(5): 766-778
Liu H, Li R H, Li S R, Hou H X, Qin T, Gao Y, Zhou Y Z, Li M J. Paleoclimate background and genetic mechanisms of different soil structures in typical black soil areas of Songliao Plain [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 766-778 (in Chinese)
- [19] 梨树县人民政府. 梨树概况[EB/OL]. [2025-06-17]. http://www.lishu.gov.cn/xq/lxxgk/201701/t20170102_29758.html#
Lishu County People's Government. Lishu overview[EB/OL]. [2025-06-17]. http://www.lishu.gov.cn/xq/lxxgk/201701/t20170102_29758.html# (in Chinese)
- [20] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 邹洪涛, 汪景宽, 张佳宝. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504
Xu Y D, Pei J B, Li S Y, Zou H T, Wang J K, Zhang J B. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 495-504 (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Analysis of Soil and Agrochemistry* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press Co., Ltd., 2000 (in Chinese)
- [22] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 余世鹏. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100-106, 29
Wu Y K, Liu G M, Yang J S, Yu S P. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 100-106, 296 (in Chinese)
- [23] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 张军连, 刘黎明, 陈焕伟. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 71-75
Zhang F R, An P L, Wang J Y, Zhang J L, Liu L M, Chen H W. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading [J]. *Resources Science*, 2002, 24(2): 71-75 (in Chinese)
- [24] 周佳松, 刘秀华, 廖兴勇, 刘勇. 南方丘陵区土地整理新增耕地质量评价研究[J]. 西南农业大学学报: 社会科学版, 2004, (1): 30-33
Zhou J S, Liu X H, Liao X Y, Liu Y. Research of the appraisal of the quality of newly-increased cultivated land in hilly regions of south China [J]. *Journal of Southwest Agricultural University: Social Science Edition*, 2004, (1): 30-33 (in Chinese)
- [25] 许旺旺, 马倩倩, 蔡立群. 基于《耕地质量等级》的靖远县耕地质量等级评价[J]. 草原与草坪, 2021, 41(1): 94-102, 112
Xu W W, Ma Q Q, Cai L Q. Evaluation of cultivated land quality grade in Jingyuan County Based on ‘Cultivated Land Quality Grade’ (GB/T33469po2016) [J]. *Grassland and Turf*, 2021, 41(1): 94-102, 112 (in Chinese)
- [26] 全国农业技术推广服务中心, 农业部耕地质量监测保护中心, 沈阳农业大学. 东北黑土区耕地质量评价[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017
National Agricultural Technology Extension Service Center, Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center of Ministry of Agriculture, Shenyang Agriculture University. *Evaluation of cultivated land quality in the Black Soil Region of Northeast China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese)
- [27] 曾荣, 赵荣, 梁勇. AHP-灰色关联度分析法的耕地质量评价: 以湖北省襄阳市为例[J]. 测绘科学, 2018, 43(8): 90-96
Zeng R, Zhao R, Liang Y. Cultivated land quality assessment based on AHP-grey correlation analysis method; Taking Xiangyang City of Hubei Province as an example [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(8): 90-96 (in Chinese)
- [28] 刘舒馨, 唐祥云, 张燧, 董婷. 基于熵权和变异系数组合赋权法的耕地质量评价实证研究[J]. 国土与自然资源研究, 2016(4): 45-50
Liu S X, Tang X Y, Zhang Y, Dong T. Empirical research on evaluation of quality of cultivated land and entropy variation coefficient combination weighting method [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2016(4): 45-50 (in Chinese)
- [29] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 杨江浩, 刘晨, 方庆. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 622-628
Shan C J, Dong Z C, Fan K M, Yang J H, Liu C, Fang Q. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(6): 622-628 (in Chinese)
- [30] 谢捷, 刘玮, 徐月顺, 雷春苗. 基于 AHP-熵权法的西宁地区汛期暴雨灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 60-74
Xie J, Liu W, Xu Y S, Lei C M. Rainstorm disaster risk assessment in Xining area in rainy season based on the AHP weight method and entropy weight method [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 60-74 (in Chinese)
- [31] 匡丽花, 叶英聪, 赵小敏, 郭熙. 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 L H, Ye Y C, Zhao X M, Guo X. 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)
- [32] 姚东恒, 裴久渤, 汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(1): 104-114
Yao D H, Pei J B, Wang J K. Temporal-spatial changes in cultivated land quality in a black soil region of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 104-114 (in Chinese)
- [33] 刘湘君, 乔冠宇, 郭丰浩, 刘冬, 李勇, 勾宇轩, 于茹月, 周文涛, 黄元仿. 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 X J, Qiao G Y, Guo F H, Liu D, Li Y, Gou Y X, Yu R Y, Zhou W T,

- Huang Y F. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(12): 104-113 (in Chinese)
- [34] 张立江, 汪景宽, 裴久渤, 李双异, 安婷婷. 东北典型黑土区耕地地力评价与障碍因素诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(1): 110-117
Zhang L J, Wang J K, Pei J B, Li S Y, An T T. Evaluation of cultivated land fertility and its obstacle factors diagnosis in the typical black soil area of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(1): 110-117 (in Chinese)
- [35] 王寅, 张馨月, 高强, 李翠兰, 焉莉, 冯国忠. 吉林省农田耕层土壤pH的时空变化特征[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 387-391
Wang Y, Zhang X Y, Gao Q, Li C L, Yan L, Feng G Z. Temporal and spatial variability of soil pH in cropland of Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 387-391 (in Chinese)
- [36] 许占奇, 赵方印, 杨春明, 杨志彬. 四平市黑土地存在的问题和保护策略[J]. 农业开发与装备, 2023(4): 223-224
Xu Z Q, Zhao F Y, Yang C M, Yang Z B. Problems and protection strategies of black land in Siping City[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2023(4): 223-224 (in Chinese)
- [37] 刘星廷, 乔江波, 杨涛, 马雅莉, 田涵洋, 韩晓阳, 朱元骏. 毛乌素沙地不同土地利用方式下土壤饱和和导水率垂向分布特征[J]. 地球环境学报, 2024, 15(4): 665-674
Liu X T, Qiao J B, Yang T, Ma Y L, Tian H Y, Han X Y, Zhu Y J. Vertical distribution characteristics of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in the Mu Us sandy land[J]. *Journal of Earth Environment*, 2024, 15(4): 665-674 (in Chinese)
- [38] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Huang C Y. *Soil Science*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [39] 谢国雄, 胡康赢, 王忠, 楼玲, 章秀梅. 耕地土壤有机质提升的几点思考[J]. 江西农业学报, 2020, 32(4): 78-83
Xie G X, Hu K Y, Wang Z, Lou L, Zhang X M. Some thoughts on improvement of soil organic matter in cultivated land[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(4): 78-83 (in Chinese)
- [40] 谢长玉. 提升农业水利灌溉管理效率的路径[J]. 河北农机, 2024(20): 103-105
Xie C Y. Ways to improve the efficiency of agricultural irrigation management[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2024(20): 103-105 (in Chinese)
- [41] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203-1215
Ao M, Zhang X D, Guan Y X. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1203-1215 (in Chinese)
- [42] 高佳, 朱耀辉, 赵荣荣. 中国黑土地保护: 政策演变、现实障碍与优化路径[J]. 东北大学学报: 社会科学版, 2024, 26(1): 82-89
Gao J, Zhu Y H, Zhao R R. Black soil protection in China: Policy evolution, realistic obstacles and optimization paths[J]. *Journal of Northeastern University: Social Science*, 2024, 26(1): 82-89 (in Chinese)
- [43] 林立. 关于实施东北黑土地保护性耕作行动计划的几点思考[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 193-197
Lin L. Some thoughts on implementing action plan of conservation tillage on black soil region of northeast China[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(10): 193-197 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 刘湘君, 中国农业大学土地科学与技术学院耕地质量评价专业方向博士研究生。硕士和学士分别毕业于中国农业大学和山东农业大学。博士研究生期间获得二等学业奖学金。先后参与国家自然科学基金项目(U20A20115)和国家重点研发计划(2021YFD1500201), 其间作为第一作者在《农业工程学报》发表论文1篇。



通讯作者简介: 黄元仿, 博士, 中国农业大学教授, 博士生导师。国际土壤学联合会土壤工程与技术委员会主席, 中国土壤学会副理事长, 北京土壤学会理事长。主要从事土壤过程量化、耕地保育、土地整治与生态修复等研究。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目课题30余项; 在《农业工程学报》、*Environmental Science and Technology*、*Geoderma*等期刊发表学术论文200余篇; 出版学术专著30余部。