

基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法

杨振铎, 周其文, 王伟, 米长虹

引用本文:

杨振铎, 周其文, 王伟, 米长虹. 基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(12): 2780–2786.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0611>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

某铅锌尾矿库周边农田土壤重金属污染状况及风险评价

梁雅雅, 易筱筠, 党志, 王琴, 高双全, 唐婕, 张政芳

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 103–110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0252>

浙北某县域耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析

吕悦风, 孙华

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 95–102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0373>

基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价

赵杰, 罗志军, 赵弯弯, 赵越, 宋聚

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 521–533 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0732>

基于灰色关联分析法的Cd污染土壤-植物系统安全生产评价

许瑶, 肖亨, 伍钧, 孟晓霞, 徐敏, 李炎, 赖星

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1051–1059 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1164>

一种基于AHP-E模型的多因子农药残留污染综合评价方法

陈谊, 陈星如, 常巧英, 范春林

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 276–283 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0712>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨振铎, 周其文, 王伟, 等. 基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(12): 2780–2786.

YANG Z D, ZHOU Q W, WANG W, et al. Preliminary study on a fuzzy comprehensive evaluation-based method for classifying the degree of soil fertility damage of cultivated land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(12): 2780–2786.



开放科学 OSID

基于模糊综合评价法的耕地土壤肥力损害分级方法

杨振铎^{1,2}, 周其文^{1*}, 王伟^{1,2}, 米长虹^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业生态环境及农产品质量安全司法鉴定中心, 天津 300191)

摘要:从土壤肥力整体状况出发, 采用模糊综合评价法构建了耕地土壤肥力损害程度分级方法, 综合考虑了土壤肥力指标对耕地土壤损害程度的影响, 可以对耕地土壤的损害破坏程度进行量化。同时通过案例对模糊综合评价法进行了应用研究, 结果表明, 模糊综合评价法评估较为全面, 评价结果清晰、直观。

关键词:耕地; 模糊综合评价法; 损害程度等级

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)12-2780-07 doi:10.11654/jaes.2023-0611

Preliminary study on a fuzzy comprehensive evaluation-based method for classifying the degree of soil fertility damage of cultivated land

YANG Zhenduo^{1,2}, ZHOU Qiwen^{1*}, WANG Wei^{1,2}, MI Changhong^{1,2}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Forensic Center of Agro-Ecological Environment and Agro-Product Quality Safety, Tianjin 300191, China)

Abstract: In this study, fuzzy comprehensive evaluation (FCE) was used to construct a method for classifying the degree of soil fertility damage of cultivated lands on the basis of the overall soil fertility. This method comprehensively considered the influence of the soil fertility index and could quantify the degree of damage of cultivated land soil. At the same time, the applicability of the FCE-based classification method was evaluated through a case study. It was found that the FCE-based classification method gave more extensive, clear, and intuitive results.

Keywords: cultivated land; fuzzy comprehensive evaluation method; degree of damage

耕地是农业生产的基础, 也是粮食生产的重要保障。然而, 在各种利益驱使下, 采矿塌陷、压占、地面硬化、垃圾填埋、环境污染等行为致耕地土壤破坏现象时有发生, 其已经成为制约粮食安全和重要农产品稳产保供的重要因素之一。耕地损害程度认定是耕地破坏认定的关键环节。针对耕地破坏, 国家出台了一系列措施, 包括《国务院办公厅关于坚决制止耕地“非农化”行为的通知》(国办发明电〔2020〕24号)、《国务院办公厅关于防止耕地“非粮化”稳定粮食生产的意见》(国办发〔2020〕44号)等。

依据《生态环境损害赔偿制度改革方案》, 生态环境损害是指因污染环境、破坏生态造成大气、地表水、地下水、土壤、森林等环境要素和植物、动物、微生物等生物要素的不利改变, 以及上述要素构成的生态系统功能退化。由此, 耕地损害是指因污染环境、破坏生态造成耕地土壤减少、耕地物理结构不利改变、种植条件发生不利改变甚至彻底丧失等, 或导致耕地农产品产量降低、品质下降。20世纪60年代, 国外就开始了耕地损害研究, 1965年, Urbana等研究了土壤生产力、建筑物价值和位置对耕地价值的影响, 并对受高速公路建造

收稿日期: 2023-07-30 录用日期: 2023-10-24

作者简介: 杨振铎(2000—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 从事农业环境损害鉴定研究。E-mail: 17350896917@163.com

*通信作者: 周其文 E-mail: caezhouqiwen@126.com

基金项目: 中国农业科学院创新工程项目

Project supported: The Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences

影响的耕地价值损失量进行了估计^[1]。日本学者分析了因煤炭开采造成的地表沉陷对耕地的影响,并且据此提出了农田损毁修复方案^[2]。Hu等^[3]利用GIS(地理信息科学)空间叠置分析,并结合农作物减产预测模型对受损耕地区域进行系统分析和计算,揭示了耕地损毁的叠置特征和程度。近年来,国内学者对耕地损害的研究集中在损害程度量化以及耕地损害指标体系的建立等方面。李晶等^[4]以耕地土壤特征、耕地环境变化以及耕地配套设施为指标层建立了采煤区耕地损毁程度评价体系。朱海娣等^[5]将耕地破坏类型分为地面硬化、挖损、污染、地面塌陷和压占,并且据此初步建立了耕地损毁鉴定体系。蔡华杨^[6]加入了自然损毁,并以此建立了耕地损毁程度指标体系。杨紫千^[7]在对2008—2018年沈阳市的耕地破坏案例进行分析之后,针对挖损、地面硬化、压占3种耕地破坏形式对耕地种植条件的影响以及恢复的难易程度进行了深入分析,提出了3种耕地破坏类型的破坏程度量化指标。王振宇^[8]认为国内耕地破坏程度鉴定工作存在鉴定标准模糊不清、缺少行业标准的缺点。尽管目前对于耕地损害的研究有所进展,但是仍然没有形成公认的耕地损害程度量化指标。耕地损害是一个复杂的问题,由多个因素共同作用,目前的研究在判定耕地土壤损害程度上,都是以单一指标的最严重损害程度为准,而不是综合考虑各种指标的影响。由于土壤立地条件、耕层厚度、土壤容重、机械组成等指标破坏现象较为明显,而土壤肥力破坏造成的耕地损害不易察觉,所以从土壤整体肥力状况角度研究耕地损害较少。但土壤肥力指标是判断耕地损害的重要组成部分,因此本文对采用模糊综合评价法进行耕地土壤肥力损害程度评价进行探讨。

1 方法选择

1.1 综合评价方法选择

对土壤肥力进行综合评价的方法有模糊综合评价法、数据包络法、灰色关联度法等。

1.1.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法^[9-10]是一种多指标决策方法,其基于模糊数学理论,将模糊概念和数学方法结合起来,能够考虑多个评价指标的权重和相互关系,使得综合评价结果更全面,且可以用于处理模糊和不确定的评价问题。但是该方法依赖于专家对评价指标的模糊集合和隶属度函数的确定,存在主观性和不确定性。

1.1.2 数据包络法

数据包络法^[11]是一种用于评估相对效率的非参

数评估方法,可以在多个输入和输出指标下评估决策单元的绩效,并找出表现最优的决策单元,称为有效决策单元,因此该方法能够更全面地衡量组织或个体的效率。但是数据包络分析容易受到极值的影响,因此需要谨慎选择指标。

1.1.3 灰色关联度法

灰色关联度法^[12]是一种多指标决策分析方法,用于研究多个影响因素之间的关联性和影响程度。灰色关联分析的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小。灰色关联度评价法可以处理数据不完备和信息缺失的情况,适用于缺乏完整数据的评价问题,并且可对各个评价指标的关联程度进行量化,更客观地评价指标之间的关系。但灰色关联度法要求样本数据具有时间序列特性,且只能判断评价对象的优劣,不能反映评价对象的绝对水平^[13]。

土壤肥力损害评估涉及到较多指标和因素,存在一定的不确定性。模糊综合评价法能够有效处理不确定性问题,通过引入模糊隶属函数来描述指标之间的模糊关系,更全面地考虑各个因素的影响。灰色关联度法是对地区的损害程度进行排序,并不会形成损害程度的分级结果。数据包络法是多个输入对应多个输出。因为本研究只需要损害程度分级结果一个输出结果,因此考虑采用模糊综合评价法进行耕地土壤肥力损害程度评价。

1.2 权重确定方法选择

常用确定指标权重的方法有层次分析法、熵权法以及变异系数法等。

1.2.1 层次分析法

层次分析法^[14]通过将复杂问题分解为层次结构,将问题分解为一系列易于理解和处理的子问题。这使得决策者能够更清楚地理解问题的本质和组成部分,并更好地分析和比较各个因素的重要性。层次分析法是在综合专家的主观评价基础上,对各影响因素进行综合评价,从而确定各因素的权重。这对于涉及主观判断和领域知识的问题非常有用,可以充分利用专家的经验 and 直觉。但层次分析法的结果高度依赖于决策者的主观判断和偏好。不同的决策者可能会给予不同的权重和评价,从而导致结果的不一致性。当问题的层次结构较大且复杂时,层次分析法可能会变得非常繁琐和复杂,需要大量的计算和比较。这可能会增加决策过程的复杂性和耗时性。

1.2.2 熵权法^[15]

熵权法是一种客观赋权法,通过各项指标数据观测值所提供的信息大小来确定指标权重,不受指标量纲和测量范围的影响,适用于不同类型的指标,且计算逻辑简单清晰,操作性较好,易于实现。熵权法往往会忽视决策者主观的意图,不能考虑到指标之间的相关性,且熵权法仅凭数据的波动程度,不考虑数据的实际意义,很可能得出违背常识的结果。

1.2.3 变异系数法^[12]

变异系数法是一种客观赋权法,是根据统计学方法计算得出系统各指标变化程度的方法,可直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重。变异系数法较为简单,能够有效区分各个指标,但使用变异系数法的前提是各个指标的重要性相当,指标的方差越大只能说明该指标对不同方案的区分度很高,并不能等同于指标的重要度,因此使用变异系数法时,对指标选取有一定要求。

层次分析法适合在已知目标的情况下进行权重确定,对于土壤肥力损害分级指标权重的确定,通常会有明确的评价目标,例如本文的评价目标是划定不同级别的土壤肥力损害程度。土壤肥力损害分级涉及多个指标,层次分析法能够处理多目标、多指标的复杂决策问题,适合对这些指标进行层次化比较和权重确定,且土壤肥力损害分级涉及到农业专家、土壤学者等多个领域的专业知识,他们对不同指标的重要性有着主观判断和偏好,层次分析法允许决策者对不同指标进行主观判断和比较,能够充分考虑专家的意见和经验,而熵权法和变异系数法属于客观赋权法,并不能充分考虑到土壤肥力的重要性,因此本文采用层次分析法确定土壤肥力损害分级指标权重。

2 损害程度分级方法

选取有机质、全氮、全磷、全钾作为评价耕地土壤肥力状况的具体指标,利用层次分析法设计调查问卷,通过问卷咨询专家确定指标权重。在此基础上,利用模糊综合评价法对耕地肥力损害程度进行模糊综合评价,获得评价等级的隶属度矩阵,从而得到最终评价结果^[16]。

2.1 评价指标选择

全氮、全磷、全钾是植物生长所需的主要营养元素,对植物生长和发育至关重要,它们的含量水平能够直接反映土壤中养分的供应情况和对植物的养分供给能力。土壤有机质含量与土壤质地有密切关系,

有机质对于改善土壤结构、水分保持能力和提供养分起着重要作用。在耕地土壤肥力研究中,大多数学者将土壤有机质含量、全氮含量、有效磷含量和速效钾含量作为土壤肥力评价的关键性指标,《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)将有机质、全氮、全磷、全钾在土壤中的含量作为土壤肥力评价的关键性指标,该规范认为,有机质、全氮、全磷、全钾是比较稳定的土壤性质,并且这些指标对于气候和管理条件变化较敏感,能够监测出土地质量退化导致的指标变化。因此,本文将土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量作为耕地损害等级划分的指标。

2.2 构建评价指标集合

为每个评价指标定义模糊集合,按照《农用地土壤环境损害鉴定评估技术规范》(NY/T 4155—2022)的规定,将耕地土壤损害程度分为3个程度,依次为轻度损害、中度损害、重度损害。轻度损害是指土壤质量受到一定程度的影响,但尚未严重影响植物生长和土壤功能,这种程度的损害一般可以通过适当的土壤管理和修复措施来纠正,以恢复土壤的肥力和功能。中度损害是指土壤遭受相当程度的破坏,导致植物生长受限和土壤功能明显下降,需要更加综合和深入的土壤修复措施,以恢复土壤的肥力。重度损害是指较难恢复至基线水平或恢复成本过大的土壤损害。土壤环境基线是指污染环境或破坏生态未发生时评估区土壤的化学元素或化合物含量、理化性质以及生物特性以及生态服务功能等的状态。根据3种损害程度对应将土壤肥力破坏等级划分为三级,模糊集合为等级Ⅰ、等级Ⅱ、等级Ⅲ。

2.3 数据收集

参照区设置及其他参比标准参考《生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第1部分:土壤和地下水》(GB/T 39792.1—2020)中对基线水平调查部分的要求。由于土壤肥力损害等级缺乏相应的文献和标准支撑,因此本文采取问卷调查的方式对耕地土壤肥力损害等级进行划分。问卷分为土壤肥力相对重要性以及土壤肥力损害等级两部分。

在土壤肥力损害等级方面,参考《农用地土壤环境损害鉴定评估技术规范》(NY/T 4155—2022)与《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)的规定,有机质含量与对照区相比下降25%,耕地质量下降一个等级,有机质减少的损害等级对应为轻度损害,因此初步划分有机质含量每下降25%为一个损害等级。以此为参考,问卷设置了以单一指标含量下降幅度

15%为一个损害等级为起点,每隔5%为一个标度,至下降幅度30%为一个损害等级为止,共5个等级区间选项。在土壤肥力指标的相对重要性方面,在解释了层次分析法的数字标度含义后,对土壤肥力的4个指标进行相对重要性的两两比较,要求专家对指标的相对重要性给出数字标度。本次一共发放20份调查问卷,共有12份问卷通过层次分析法的一致性检验。土壤肥力单一指标损害评价标准结果如表1所示,由于经过问卷调查的有机质的损害等级分级结果与《农用地土壤环境损害鉴定评估技术规范》(NY/T 4155—2022)中的规定相差5%,结果相差较小,因此以专家咨询的结果为准。

表1 土壤肥力单一指标损害评价标准(%)

Table 1 Evaluation criteria of single index destruction of soil fertility (%)

指标 Index	轻度损害 Minor impairment	中度损害 Moderate impairment	重度损害 Severe impairment
有机质含量(减少)	<20	20~40	>40
全氮含量(减少)	<25	25~50	>50
全磷含量(减少)	<25	25~50	>50
全钾含量(减少)	<25	25~50	>50

通过问卷对土壤肥力指标的相对重要性进行调查,在问卷中采用了1~9比率标度法^[17],比较指标的重要程度,数字代表指标之间的相对重要性,数字越大代表相对重要性越强。建立各层次的判断矩阵,判断矩阵特点是斜对角线为1,表示自己与自己的重要性完全相等;右上角和左下角数据呈互为倒数对称格式。判断矩阵的元素标度及其含义如表2所示。

将通过一次性检验的问卷,参考《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T 1634—2008),去掉两端各25%的意见,对回收得到的问卷进行均值处理,变异系数均小于30%,数据较稳定,根据专家咨询打分

表2 判断矩阵的元素标度及其含义

Table 2 Judge the element scale of matrix and its meaning

标度 Scale	含义 Implication
1	两个指标同样重要
3	两个指标相比,一个指标比另一个指标稍微重要
5	两个指标相比,一个指标比另一个指标明显重要
7	两个指标相比,一个指标比另一个指标强烈重要
9	两个指标相比,一个指标比另一个指标极端重要
2,4,6,8	介于上述判断的中值

结果进行均值化处理。为方便后续计算,对专家打分的均值结果进行四舍五入求近似值处理,得到的判断矩阵如表3所示。

表3 判断矩阵

Table 3 Judgment matrix

项目 Item	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
有机质	1	4.0	5.0	5.3
全氮	1/4	1	2.7	4.0
全磷	1/5	10/27	1	2.3
全钾	10/53	1/4	10/23	1

2.4 模糊化

运用模糊综合法将数据转化为模糊集合,运用隶属函数将数据映射到对应的模糊集合中。根据模糊数学理论,将常用的隶属度函数分为3种^[18]:三角隶属度函数、梯形隶属度函数、高斯隶属度函数。除了上述3种常见的隶属度函数之外,还有其他一些类型的隶属度函数,如指数型隶属度函数、锯齿形隶属度函数、S形隶属度函数、倒U形隶属度函数、双曲线隶属度函数等。

由于土壤肥力损害等级划定的损害等级区间是分段表示的,因此适合采用梯形隶属度函数。梯形隶属度函数是一种梯形状的函数,通常用来描述模糊集合中元素的隶属度。梯形隶属度函数的形式如图1所示。

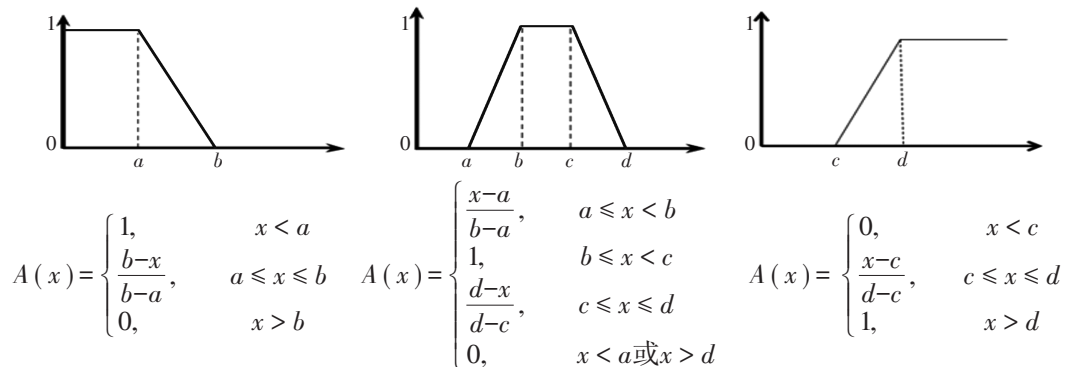


图1 梯形隶属度函数

Figure 1 Trapezoidal membership function

根据土壤肥力评价标准建立各指标隶属度函数,各指标隶属度函数的转折点取值如表4所示。各指标取值参照表1, a_1 为轻度损害的指标上限和中度损害的指标下限, a_3 为中度损害的指标上限和重度损害的指标下限, a_2 为中度损害的标准值, a_4 为重度损害的标准值。标准值一般取评价区间前后区间的平均值^[19]。

等级Ⅰ的隶属度函数:

$$A_I(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 < x \leq a_2 \\ 0, & x > a_2 \end{cases} \quad (\text{式1})$$

等级Ⅱ的隶属度函数:

$$A_{II}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x \leq a_2 \\ 1, & a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 < x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \text{ 或 } x \leq a_1 \end{cases} \quad (\text{式2})$$

等级Ⅲ的隶属度函数:

$$A_{III}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_2 \\ \frac{x - a_2}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x < a_3 \\ 1, & x \geq a_3 \end{cases} \quad (\text{式3})$$

表4 各指标隶属度函数的转折点取值(%)

Table 4 The turning point value of membership function of each index(%)

指标 Index	有机质含量 (减少) Organic matter content (decreased)	全氮含量 (减少) Total nitrogen content (decrease)	全磷含量 (减少) Total potassium content (decreased)	全钾含量 (减少) Total phosphorus content (decreased)
a_1	20	25	25	25
a_2	30	37.5	37.5	37.5
a_3	40	50	50	50
a_4	50	62.5	62.5	62.5

2.5 确定权重

根据表3的判断矩阵,采用和积法确定耕地土壤肥力损害指标的指标权重。和积法步骤如下:

①对判断矩阵中每一列的所有元素进行归一化处理。

$$\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

②把每一列归一化处理后的判断矩阵按行相加。

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \hat{a}_{ij}$$

③进行归一化处理,得到每个指标的权重值。

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i}, i=1, 2, 3, \dots, n$$

④按照下列公式计算最大特征根($\lambda_{\max}$)。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n w_i}, i=1, 2, 3, \dots, n$$

⑤一致性检验,求出一致性指标值(CI)。

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

式中: n 为判断矩阵的阶数。

⑥根据表5查询一致性检验指标(RI)的取值。

表5 一致性检验指标取值

Table 5 Consistency test index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

⑦计算一致性比率(CR)。

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

一般情况下CR值小于0.1,则判断矩阵满足一致性检验;如果CR值大于0.1,则说明不具有 consistency,应该对判断矩阵进行适当调整之后再次进行分析。权重确定结果如表6所示。

表6 权重确定

Table 6 Weight value division

指标 Index	权重 Weight
有机质含量(减少)	0.57
全氮含量(减少)	0.23
全磷含量(减少)	0.13
全钾含量(减少)	0.07

2.6 模糊运算

根据模糊综合评价法的原理和方法,结合隶属度函数,使用模糊逻辑对模糊集合进行运算,得到模糊评价矩阵。

评价步骤如下:

对于第*i*个指标 u_i 而言,其权重值为 w_i ,故而权重矩阵 W 为:

$$W = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \dots \ w_i]$$

对于第*i*个指标 u_i 而言, r_{i1} 代表第*i*个指标对应评价等级1的隶属度, r_{i2} 代表第*i*个指标对应评价等级2的隶属度,以此类推,第*i*个指标对各评价等级的隶属函数矩阵为:

$$r_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3} \ r_{i4}]$$

所有指标的隶属度矩阵 R_n 为:

$$R_n = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \dots\dots\dots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix}$$

因此,土壤肥力损害等级的模糊评价矩阵 F_i 为:

$$F_i = W \cdot R_n \quad (\text{式4})$$

2.7 解模糊化

对模糊评价矩阵做归一化处理,根据得到的模糊评价矩阵 F_i 的结果,按照最大隶属度原则,选择矩阵 F_i 中隶属度最大的损害等级作为耕地土壤肥力状况损害等级。

3 实例研究

3.1 受损地区概况

对耕地受损的4个案例进行研究,每个区域受损耕地肥力减少幅度如表7所示。

表7 受损耕地肥力减少幅度(%)

Table 7 Decrease of fertility of damaged cultivated land(%)

案例 Case	有机质含量 (减少) Organic matter content (decreased)	全氮含量 (减少) Total nitrogen content (decrease)	全钾含量 (减少) Total potassium content (decreased)	全磷含量 (减少) Total phosphorus content (decreased)
1	48.4	46.4	4.3	46.6
2	41.2	41.6	2.7	7.0
3	27.6	19.7	18.8	7.0
4	41.8	38.3	0	35.2

3.2 确定指标隶属度

以案例1为例:

①土壤有机质含量(减少)隶属度:

土壤有机质含量减少量为48.4%,代入式1、式2和式3,得出土壤有机质含量的初始隶属度矩阵为:

$$r_1' = [0 \ 0.16 \ 1]$$

对 r_1' 进行归一化处理,得到土壤有机质含量的隶属度矩阵为:

$$r_1 = [0 \ 0.14 \ 0.86]$$

②土壤全氮含量(减少)归一化处理隶属度矩阵为:

$$r_2 = [0 \ 0.58 \ 0.42]$$

③土壤全钾含量(减少)归一化处理隶属度矩阵为:

$$r_3 = [1 \ 0 \ 0]$$

④土壤全磷含量(减少)归一化处理隶属度矩阵为:

$$r_4 = [0 \ 0.58 \ 0.42]$$

因此案例1的 U_1 隶属度矩阵 R_1 为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.14 & 0.86 \\ 0 & 0.58 & 0.42 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.58 & 0.42 \end{bmatrix}$$

3.3 模糊综合评价

根据表6所示, $w_1 = [0.57 \ 0.23 \ 0.13 \ 0.07]$

将 w_1 代入式4,得到 $F_1 = w_1 \cdot R_1 = [0.13 \ 0.25 \ 0.62]$

结果显示,案例1对轻度损害的隶属度为0.13,对中度损害的隶属度为0.25,对重度损害的隶属度为0.62。根据最大隶属度原则,案例1的耕地肥力状况损害等级评价结果为重度损害,较难恢复至基线水平。其他3个案例评价结果见表8。

表8 案例耕地肥力状况损害程度评价结果

Table 8 Evaluation results of damage degree of cultivated land fertility status in the case

案例 Case	耕地肥力状况损害等级 Damage grade of cultivated land fertility status	模糊评价隶属度 Membership degree of fuzzy evaluation
1	重度损害	0.62
2	中度损害	0.44
3	轻度损害	0.57
4	中度损害	0.53

4 结果

本研究从土壤肥力整体状况角度出发,探究模糊综合评价法应用于耕地土壤肥力损害程度分级的可行性。通过问卷调查,将有机质、全氮、全磷、全钾作为耕地损害程度评价指标,采用和积法确定指标权重,通过模糊综合评价法结合指标权重确定耕地损害程度,最终提出了一套耕地土壤损害等级划分的方法。模糊综合评价法与层次分析法结合,能够实现定性与定量的统一,减少了人为主观判断所带来的不利影响,更符合客观实际。在对4个案例进行应用验证后表明,该方法评价结果清晰、直观,与案例鉴定意见相吻合,具备实用性。

5 展望

本研究引入模糊综合评价法建立了土壤肥力损害程度分级方法评价体系,充分考虑评价因素的指标值、评价因素权重、评价因素对土壤肥力的共同作用,体现了土壤肥力损害等级评价中所存在的模糊性特点。然而土壤肥力还受季节、光照、气温、施肥等各种因素的不同程度的影响,因此需全盘考虑才可以作为

对现实农业生产的理论指导。未来的研究可以根据不同尺度,选择不同的评价指标和标准。对于田块尺度,可以增加土壤物理、化学特性指标,明确耕地损害等级。对于县域尺度,可以结合耕地类型、运用GIS等工具获取耕地损害等级评价图。对于区域和国家尺度,可以增加气候、经济、地形等因素作为评价指标进行耕地损害等级评价。

参考文献:

- [1] University of Illinois. Condemnation, land value, and severance damage on farmland[M]. Illinois: University of Illinois Agricultural Experiment Station, 1965.
- [2] SHIBATA S. Investigation and analysis of damage done to farmland due to coal mining[J]. *The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering*, 1980, 86: 64-73.
- [3] HU Z Q, YANG G H, WU X, et al. Farmland damage and its impact on the overlapped areas of cropland and coal resources in the eastern plains of China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 86: 1-8.
- [4] 李晶, 刘喜韬, 胡振琪, 等. 高潜水位平原采煤沉陷区耕地损毁程度评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 209-216. LI J, LIU X T, HU Z Q, et al. Evaluation on farmland damage by underground coal-mining in plain area with high ground-water level[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 209-216.
- [5] 朱海娣, 尹国庆, 毛雪, 等. 耕地损毁鉴定指标体系研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(2): 73-79. ZHU H D, YIN G Q, MAO X, et al. Arable land damage identification index system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(2): 73-79.
- [6] 蔡华杨. 耕地损毁程度评价指标体系研究[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(2): 98-101. CAI H Y. Research on the evaluation index system of cultivated land damage degree[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(2): 98-101.
- [7] 杨紫千. 沈阳市耕地破坏程度判定标准研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 43-55. YANG Z Q. Study on the criteria for determining the degree of farmland destruction in Shenyang[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 43-55.
- [8] 王振宇. 耕地破坏程度鉴定思考[J]. 中国土地, 2015(5): 30-31. WANG Z Y. Thoughts on the identification of cultivated land damage degree[J]. *China Land Science*, 2015(5): 30-31.
- [9] 戴西超, 张庆春. 综合评价中权重系数确定方法的比较研究[J]. 煤炭经济研究, 2003(11): 37. DAI X C, ZHANG Q C. Comparative study on the determination methods of weight coefficient in comprehensive evaluation[J]. *Coal Economic Research*, 2003(11): 37.
- [10] 陈强强. 基于TOPSIS-灰色关联分析法的我国房地产企业可持续发展评价[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 34-37. CHEN Q Q. Evaluation of sustainable development of China's real estate enterprises based on TOPSIS-grey relational analysis method[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021: 34-37.
- [11] 李美娟, 陈国宏. 数据包络分析法(DEA)的研究与应用[J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 88-94. LI M J, CHEN G H. A review on the research and application of DEA[J]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 5(6): 88-94.
- [12] 赵宏, 马立彦, 贾青. 基于变异系数法的灰色关联分析模型及其应用[J]. 黑龙江水利科技, 2007, 35(2): 26-27. ZHAO H, MA L Y, JIA Q. Grey correlation analysis model based on coefficient of variation method and its application[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2007, 35(2): 26-27.
- [13] 潘希, 罗伟, 段兴武, 等. 水土保持效益评价方法研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 140-150. PAN X, LUO W, DUAN X W, et al. Advances in evaluation methods of soil and water conservation benefits in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1): 140-150.
- [14] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999(5): 119-122. ZHU Y, MENG Z Y, KAN S Y. Determination of weight value by AHP[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 1999(5): 119-122.
- [15] 王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术经济与管理研究, 2003(6): 48-49. WANG K, SONG H Z. Comparative analysis of three objective weight empowerment methods[J]. *Technoeconomics & Management Research*, 2003(6): 48-49.
- [16] 周红满. 采煤沉陷区地表建筑物损害AHP-模糊综合评价模型研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015: 24-41. ZHOU H M. Research of surface buildings damaged AHP-Fuzzy Synthetic Evaluation Model for mining subsidence area[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015: 24-41.
- [17] 谭跃进. 定量分析方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012. TAN Y J. Quantitative analysis method[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012.
- [18] 张敬信. 模糊综合评价经典案例及Matlab & R实现[EB/OL]. [2023-06-01] <https://zhuanlan.zhihu.com/p/464943434>. ZHANG J X. Fuzzy comprehensive evaluation of classic cases and Matlab & R implementation[EB/OL]. [2023-06-01] <https://zhuanlan.zhihu.com/p/464943434>.
- [19] 文学菊, 周家云, 朱创业. 矿山土地破坏程度评价: 以攀枝花市花山煤矿为例[J]. 山地学报, 2006(3): 378-384. WEN X J, ZHOU J Y, ZHU C Y. Evaluation on the degree of destructed land in area of mining: a case study of Huashan coal mine[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006(3): 378-384.