



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(02):176-188.

YU Fenxia, LI Hong, MA Junhua, HE Jing. Evaluation of the comprehensive benefit of biodegradable mulch based on AHP-entropy weight method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02): 176-188.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.16

基于AHP-熵权法的全生物降解地膜综合效益评价

余奋霞¹ 李虹² 马俊花² 贺婧^{1,3*}

(1. 宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021;

2. 宁夏回族自治区农业环境保护监测站, 银川 750021;

3. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要 为解决全生物降解地膜(BioDegradable Mulch, BDM)能否在宁夏银北灌区代替普通聚乙烯(PolyEthylene, PE)地膜以解决“白色污染”问题和实现土壤资源的可持续利用,以种植西红柿为例,在该地区设置2种BDM(F和X)、普通PE地膜(PE)、未覆膜(CK)共4种处理,开展了2年田间定位试验,采用主观赋权法即层次分析法,辅以客观赋权法即熵权法,并结合3大效益(经济效益、技术效益和生态效益)共9个指标对BDM的综合效益及敏感性进行分析。结果表明:综合效益指数表现为F最高,X次之,然后是PE,最低为CK。其中,F、X分别比PE高出38.72%、6.48%,比CK高出122.65%、70.91%;敏感性分析表明,与PE相比,BDM的最大敏感因子为西红柿产量与地膜分解率。综上,在宁夏银北灌区生产中推广应用BDM的可行性高,可以使用BDM代替普通PE地膜。

关键词 AHP-熵权法;全生物降解地膜;综合效益;敏感性分析;田间试验

中图分类号 S626.2

文章编号 1007-4333(2025)02-0176-13

文献标志码 A

Evaluation of the comprehensive benefit of biodegradable mulch based on AHP-entropy weight method

YU Fenxia¹, LI Hong², MA Junhua², HE Jing^{1,3*}

(1. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Environmental Protection Monitoring Station, Yinchuan 750021, China;

3. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract In order to solve the problem of "white pollution" and realize the sustainable utilization of soil resources, the BioDegradable Mulch (BDM) could replace PolyEthylene (PE) plastic film in the north of Yinchuan City, Ningxia Province? Two kinds of BDM (F and X), common PE plastic film (PE) and non-mulching (CK) were set up in this area, and the field positioning experiment was carried out for 2 years. The comprehensive benefit and sensitivity of BDM were analyzed by using subjective weighting method (analytic hierarchy process), supplemented by objective weighting method (entropy weight), and combining with 9 indexes of three major benefits (economic benefit, technical benefit and ecological benefit). The results show that the comprehensive benefit index of F is the highest, followed by X, followed by PE, and the lowest is CK. Among them, F and X are 38.72% and 6.48% higher than PE, and 122.65% and 70.91% higher than CK respectively. Sensitivity analysis shows that compared with PE, the biggest

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277466);宁夏自然科学基金项目(2023AAC02028)

第一作者: 余奋霞(ORCID:0009-0000-9176-496X),硕士研究生,E-mail:3087640354@qq.com

通讯作者: 贺婧(ORCID:0009-0008-5043-4006),副教授,主要从事农业环境与生态研究,E-mail:hejing@nxu.edu.cn

sensitive factors of BDM are tomato yield and plastic film decomposition rate. To sum up, it is feasible to popularize and apply BDM in the production of the Yellow River diversion Irrigation District in the north of Yinchuan City, Ningxia Province, and BDM can be used instead of ordinary PE film.

Keywords AHP-entropy weight; BDM; comprehensive benefit; sensitivity analysis; field trial

地膜覆盖措施有利于土壤保水、土壤温度调节和杂草控制,从而有效提高作物产量和水分利用效率^[1]。地膜覆盖技术自1974年被引进我国后,得到广泛应用,2017年我国地膜使用量约占世界总量的70%^[2],成为全球最大的地膜使用国^[3]。目前在我国使用的地膜的主要成分为聚乙烯(PolyEthylene, PE),其具有异常稳定的分子结构,在表层土壤中降解期高达数百年^[4],残膜遗留在土壤中对土壤环境及作物产生“白色污染”^[5],降低土壤透气性和蓄水性^[6],阻碍作物根系发育和养分吸收等^[7]。研究表明当残留薄膜超过240 kg/hm²,作物产量减少11.3%以上^[8]。随着地膜产品的革新,全生物降解地膜(BioDegradable Mulch, BDM)因可被生物降解,成为替代传统地膜最有希望的地膜^[9]。汪敏等^[10]选取PBAT/秸秆基全生物降解地膜为研究对象,同时设立PE地膜组和不覆膜组进行对比,将其应用于江苏地区番茄生产。结果表明,全生物降解地膜在降解过程中微观结构与形貌、力学强度的变化特性在120 d覆膜期内物理化学性质发生一系列变化,逐步发生了降解,而PE地膜均没有明显变化;经济效益中全生物降解地膜的成本偏高,而PE地膜的回收成本高昂;综合效益表现为前者优于后者。此外,汪敏等^[11]通过新材料开发的JAAS全生物降解地膜在成本、植株长势和生态效益3方面综合得出其优于PE地膜,可以进一步推广应用。生产中,对于全生物降解地膜的应用,不应仅依据其降解特性,还应结合其综合效益,如经济效益、技术效益和生态效益,进行全面和综合的效益评价,才能为全生物降解地膜的大面积推广提供科学的理论依据。

在综合效益评价过程中,评价指标是评价体系构建的基础,指标权重的确定是综合评价的关键环节^[12],综合评价方法是获得评价结果的重要手段。目前综合评价的赋权分为主观赋权法、客观赋权法以及主客观相结合的赋权法^[13]。主观赋权法主要有层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)、德尔菲法^[14]、模糊评价法^[15]等。AHP^[16]是目前应用广泛的主观赋权法,由Saaty^[17]提出,用于计算评价指标体系的权重,被广泛应用于分析、管理和评价领域^[18]。客

观赋权法主要有主成分分析法^[19]、因子分析法^[20]、熵权法^[21]、灰色关系分析法^[22]、模糊综合评价法^[12]以及变异系数法^[23]等。熵权法作为客观赋权法之一,通过计算指标的信息熵,并利用指标的差异程度来衡量已知数据中包含的有效信息和指标权重^[24]。熵权法因其方便性而常被用于快速估计目标的风险活动,特别是用于农业经济和环境的多目标综合分析^[25]。主观赋权法操作简单,主观随意性较强;客观赋权法主要利用试验实测数据,客观性强,但是如果过度依赖则易脱离实际。主客观结合赋权法则是将2种赋权方法相结合,能够克服单一赋权法各自的缺点,可以减少主观赋权法的主观随意性,提高客观赋权法的适用性,使得权重结果更准确可靠^[13]。

目前,针对BDM降解问题进行综合评价的方法分别有:AHP和熵权法^[13,26]、熵权-逼近理想解排序方法^[27]、主成分分析法^[28]、DNDC模型和TOPSIS法^[29]、综合指标法^[30-31]、AHP和灰色关联度法^[32]、AHP和模糊评价法^[33]。研究结果表明BDM代替普通PE地膜的可行性较高。因此,鉴于BDM综合效益属于评价领域,非常适合采用AHP方法进行分析,而熵权法可以减少主观因素的影响^[34]。本研究拟以西红柿为研究对象,选取了2种BDM(F和X),以普通PE地膜(PE)和未覆膜裸地(CK)为对照,在宁夏回族自治区平罗县开展西红柿生产覆膜试验,分析其在地膜覆盖下,西红柿的产量、经济收入、地膜残留率、分解率等指标的变化,并基于AHP-熵权法,综合经济效益、技术效益和生态效益模型对BDM开展应用效应综合评价,以期为其大面积推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验在宁夏回族自治区石嘴山市平罗县盈丰植保专业合作社进行,研究区位于105°57′42″~106°58′02″ E和38°36′18″~39°51′13″ N。属于大陆性气候,日照时数3 072 h,年平均气温8.8℃,温差大,年平均降水量184 mm,年均蒸发量1 775 mm,蒸发强烈,无霜期为171 d。在2022年、2023年

共2个试验年内的采样期间,日均温为20℃,除2022年覆膜第90天时14:00—18:00为小雨,降水量为10~15 mm外,其余采样时降水量均为0 mm,天气均为晴或多云。该地区地势平坦,土壤肥沃,耕作层深厚,土壤施有粪肥及颗粒有机肥做基肥,土壤肥力良好。

1.2 试验设计

试验设4个处理:2种PBAT/PLA(聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯/聚乳酸)型BDM,分别是F(弗润德力新材料(宁夏)股份有限公司,中国)、X(兰州鑫银环橡塑制品有限公司,中国);1种普通PE地膜——PE(弗润德力新材料(宁夏)股份有限公司,中国)和未覆膜的对照CK。3种地膜膜宽均为1.4 m,厚度0.010 mm,白色半透明。F、X地膜的主要成分均为PBAT和PLA。采用单因素随机区组设计,每个处理为1个试验小区,每个试验小区为15.0 m×7.5 m,设3次重复,共12个试验小区。供试蔬菜品种为西红柿丰收128(*Solanum lycopersicum* L.)。每年春季4月下旬进行人工覆膜,覆膜前,铺设滴灌带,喷洒除草剂仲丁灵,以抑制杂草。生长期由合作社进行常规的水肥管理。

1.3 采样及测定方法

春季铺膜后每10 d采样1次。采用曲管地温计在每个试验小区于8:00、14:00和18:00测定0~5、5~10、10~15和15~20 cm土层的土壤温度。每10 d一次在试验小区表层0~20 cm及深层20~40 cm土层采集土壤样品。采用铝盒烘干法测定土壤含水率。温度和含水率共采集11次。同时在覆膜前及生长季结束后采集各试验小区表层的土样,进行土壤养分特点(有机质、全氮、全磷、速效钾)及pH的测定^[31]。

避开最边行,2022年、2023年分别在每个试验小区随机选择10株长势均匀的植株,自西红柿成熟起,定期采摘、称重,计算单株西红柿结果数、平均单果重,最终获得西红柿产量(kg/hm²)。在未覆膜前裁取3块40 cm×30 cm各处理的新膜,用万分之一天平称重后取平均值,作为基准值(A_0)。从铺膜至生育期结束,每隔30 d在各小区内随机用中间镂空、大小为40 cm×30 cm的木框放置在地膜表面,沿木框裁取地膜1块,在室内用超声波清洗仪漂洗30 min后用蒸馏水洗干净,然后在室内自然风干。用万分之一天平称重漂洗后地膜的重量(A_1),计算

地表覆膜失重率。秋季西红柿采摘后,采用弹齿式收膜机收取PE地膜后深翻,BDM不回收,直接翻压入田。翻田整地后,在每个小区随机选取3个1 m×1 m的样地,收集深层土壤F、X、PE的残膜后带回试验室,用超声波清洗仪清洗30 min,晾干后称取碎片总重量,计算地膜残留量。同时,为了更进一步了解BDM的降解性能,在2022年春季铺设、秋季机器深翻入地下后,设置不再覆膜处理,直至2023年10月21日,采用同样方法回收残膜,计算F、X的分解率。

2 构建综合效益评估模型

2.1 综合评价体系的构建及指标测定

综合评价体系从上到下分为目标层A、标准层B和评价要素具体指标的方案层C 3个层次^[19]。为了指标体系的准确合理性,参考文献[31]和[33]及多次向农用地膜领域专家、宁夏回族自治区生态环境厅领导等征询意见以确定关键要素。在综合考虑、分析和筛选后,确定各层级的指标,详见表1。

2.2 基于AHP模型的指标权重确定

2.2.1 构造判断矩阵

基于综合评价体系的构建及指标测定,构造判断矩阵。先进行同一层次2个方案的两两比较,再将同一层次中的两方案对于上一层次因素影响的重要性比较出来,最后根据比较的结果构造出各层次两两比较的判断矩阵^[32],具体公式如下:

$$A=(a_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3;j=1,2,3;m=n=3$ 。

并且在判定矩阵中,各元素具有以下特征: $a_{ij}>0;a_{ij}=1/a_{ji};a_{ii}=1$ 。

在比较时为实现数据的科学量化,通常采用9标度法来进行^[35]。

2.2.2 确定指标的主观权重 W_{AHP}

运用专家打分法,收集宁夏大学、生态环境厅、农业农村厅、平罗县农业机械化综合服务中心等25位相关领域专家的调查问卷,构造出判断矩阵后,采用Bo等^[32]、张志成等^[36]的方法对数据进行处理,符合一致性检后得出方案层C的主观权重 W_{bi} 和标准层B的主观权重 W_{pj} 。最后得出AHP法的综合权重 $W_{综合}^{[37]}$,具体计算公式如下:

$$W_{综合}=W_{bi} \times W_{pj} \quad (2)$$

表1 综合评价体系及测度方法

Table 1 Comprehensive evaluation system and measurement method

目标层 A Target layer A	标准层 B Standard layer B	方案层 C Scheme layer C	单位 Unit	指标类型 Index type	计算方法 Calculation method
综合效益 A Comprehen- sive benefit A	经济效益 B1 Economic benefit B1	地膜单位投入值 C1 Unit input value of mulch C1	元/hm ²	负向	C1=购买地膜费用+铺膜费用+残膜回收机械费。平行3次取样取均值。
		西红柿产量 C2 Tomato yield C2	kg/hm ²	正向	C2=每hm ² 株数×单株结果数×平均单果重。平行3次取样取均值。
		覆膜增收值 C3 Laminating revenue increase value C3	元/hm ²	正向	C3=财政补贴(1 350元/hm ²)+西红柿(覆膜-不覆膜)单位净收益。平行3次取样取均值。
	技术效益 B2 Technologi- cal benefit B2	地表覆膜失重率 C4 Weight loss of surface covering C4	%	负向	C4=(A ₀ -A ₁)/A ₀ ×100%。式中:A ₀ 为每年铺膜时地膜的质量,g;A ₁ 为最后一次地表残膜取样清洗后的质量,g。平行3次取样取均值。
		地膜残留率 C5 Residual rate of plastic film C5	%	负向	C5=(A ₀ -A ₂)/A ₀ ×100%。式中:A ₂ 为每年机器深翻后用1 m ² 样方中残膜取样清洗后的质量,g。平行3次取样取均值。
		地膜分解率 C6 Decomposition rate of mulch film C6	%	正向	C6=(C5 ₂₂ -C5 ₂₃)/C5 ₂₂ 。式中:C5 ₂₂ 为2022年铺膜时的地膜残留率;C5 ₂₃ 为连续2年机器深翻后直至2023年秋季用1 m ² 样方中残膜取样清洗后的地膜残留率。平行3次取样取均值。
	生态效益 B3 Ecological benefit B3	增温性能 C7 Warming property C7	℃	正向	$C7 = \sum_{n=10}^{110} \left\{ \frac{T_{\text{表}} + T_{\text{中}}}{2} - 8 \right\}$ 。 平行3次取样取均值。
		保墒性能 C8 Entropy preserving property C8		正向	表层含水率=(A ₅ -A ₆)/A ₅ ×100%。式中:A ₅ 为烘干前表层湿土的质量,g;A ₆ 为烘干后表层干土的质量,g。平行3次取样取均值。将11次取样的含水率取均值作为表层土壤含水率。深层土壤含水率算法同表层土壤含水率,平行3次取样取均值。 C8=(表层+深层)含水率/2。
		土壤养分特点及 pH C9 Soil nutrient characteristics and pH C9	pH:无 量纲; 其余指 标均为 g/kg	正向	C9=Σ(F _{养分} ×W _{养分})。式中:F _{养分} 为每年西红柿收获后土壤取样测定养分的无量纲化值; W _{养分} 为养分对应的权重,计算方式为数据归一化后运用熵权法公式(同2.3.2)。

最后在单排序的基础上进行综合排序^[19]。

2.3 基于熵权法的指标权重确定

2.3.1 指标归一化

因为指标量纲和数量级存在差异^[26],首先采用极差法对各指标数据进行无量纲化^[37]。

$$\text{正向指标 } X_{ij}^* = (X_{ij} - X_{ij\min}) / (X_{ij\max} - X_{ij\min}) \\ (i=1,2,3; j=1,2,3) \quad (3)$$

$$\text{负向指标 } X_{ij}^* = (X_{ij\max} - X_{ij}) / (X_{ij\max} - X_{ij\min}) \\ (i=1,2,3; j=1,2,3) \quad (4)$$

式中: X_{ij} 为第*i*行第*j*列指标的实际值; $X_{ij\max}$ 为第*j*列指标的最大值; $X_{ij\min}$ 为第*j*列指标的最小值; X_{ij}^* 为 X_{ij} 标准化之后的评价价值^[37]。

其次,指标数据平移。由于计算熵值时有取对数步骤,因此将指标数据作加0.001处理,避免出现所求对数无意义的情况^[26],得出C层的9个归一化值 V_{ij} 。

方案层指标 X_{ij} 的比重的公式为:

$$X_{ij} = X_{ij}^* / \sum X_{ij}^* \quad (5)$$

2.3.2 计算指标的客观权重 $W_{\text{熵权法}}$

计算C层指标的熵权 e_j 、变异系数 g_j 、权重 $W_{\text{熵权法}}$ [27]。

$$e_j = -1/\ln^n \sum (X_{ij} \times \ln X_{ij}^*) \quad (0 \leq e_j \leq 1) \quad (6)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

$$W_{\text{熵权法C}} = g_j / \sum g_j \quad (8)$$

$$F = \sum W \times V \quad (9)$$

依据式(9)将已得出的C层的9个客观权重 $W_{\text{熵权法C}}$,再分别乘以归一化后对应的9个指标值得出客观评价价值 F_C ,再运用式(3)~(9)归一化后得出B层的3个归一化值 V_i 和对应的客观权重 $W_{\text{熵权法B}}$ 。

2.4 基于AHP-熵权法确定指标的组合权重 W_{ij}

将主观权重(层次分析法)和客观权重(熵权法)2种评价方法进行效益权重相乘后确定组合权重 W_{ij} [24,34]:

$$W_{ij} = (\Pi W_{\text{AHP}} \times W_{\text{熵权法}}) / (\sum \Pi W_{\text{AHP}} \times W_{\text{熵权法}}) \quad (10)$$

然后根据式(10)得出C1层中的综合评价价值为 $V_{ij} \times W_{\text{熵权法C}}$,同理得出C2和C3的评价价值,求和即为B1层经济效益指数 F_{B1} ,用同样方法求得技术效益指数 F_{B2} 和生态效益指数 F_{B3} 。

最后根据式(11)计算地膜的综合效益指数(Integrated Evaluation Index, IEI) [31]。具体计算公式如下:

$$\text{IEI} = \sum F_B \times W_{ij} \quad (11)$$

2.5 对方案层指标进行敏感性分析

对比多标准决策分析中的各种敏感性分析方法 [38],本研究选择单因素敏感性分析 [39],研究某个指标改变对总目标的影响程度。敏感度系数的计算公式如下:

$$\beta = \Delta A / \Delta F \quad (12)$$

式中: β 为评价指标A对于不确定因素F的敏感度系数; ΔA 为不确定因素F发生 ΔF 变化率时,评价指标A的相应变化率,%; ΔF 为不确定因素F的变化率,% [40]。通常考察不确定因素的变动比例在10%时对项目效益指标的影响,对 β 取绝对值以估计项目效益指标对它们的敏感程度,进而确定关键的敏感因素 [41]。本研究根据式(12)得出方案层中的9个敏感度系数的因子分别为 $\beta_1 \sim \beta_9$ 。

3 结果与分析

3.1 三大效益指标归一化后的数值 V_{ij}

运用式(3)和式(4)和数据平移处理,得到各处

理的归一化值 V_{ij} 结果见表2。可见:在2个试验年内,CK由于不覆膜使得负向指标地膜单位投入值、地表覆膜失重率和地膜残留率均最高,PE最低。西红柿产量最高的处理分别为F、X;覆膜增收值最高的处理为F,土壤养分特点及pH最高的处理为X,表明这几个指标中BDM处理均高于PE和CK处理。而PE处理由于其优于其他处理的增温保墒性能而表现为归一化值最高。此外,CK在增温保墒性能几乎为0,表现为归一化值最低。

3.2 三大效益指标的组合权重 W_{ij}

评价指标体系各层次判断矩阵的一致性检验结果见表3。 $\lambda_{\max}$ 指的是最大特征根,CI是一致性指数,CR是随机一致性比率。一致性指数CI与随机一致性比率CR均 <0.1 表明一致性较好且数值越小越好。可见:表3数据均满足一致性检验且检验较好。

AHP主观赋权法的主观权重 W_{AHP} 见表4。可见:综合权重中地膜分解率指标所占比例较大;其次是保墒性能;最后是地膜残留率。

熵权法的客观权重 $W_{\text{熵权法}}$ 见表5。可见:2022年的经济、技术和生态效益的 $W_{\text{熵权法}}$ 分别为0.732 8、0.746 8和0.738 3;2023年对应客观权重较2022年有所降低但降低幅度较小。表明试验在连续2年内数据较好,重复性较好。

AHP-熵权法的组合权重 W_{ij} 见表6。可见:2022年的经济、技术和生态效益的 W_{ij} 分别为0.363 8、0.281 1和0.321 1;2023年对应 W_{ij} 依次为0.390 9、0.334 9和0.307 2。表明2年内 W_{ij} 差异较小,重复性好。

3.3 综合效益指数 IEI

4种覆膜处理的综合效益指数IEI结果见图1。可见:在2个试验年内,除生态效益指数略有不同外,其余各效益指数排序相同,与年份无关,故取平均值作为讨论的IEI。IEI最高的是F,其次是X,最低是PE。

3.4 关键影响因素

为了更进一步研究某个指标对综合效益的影响,对BDM综合效益进行敏感性分析,结果见图2。由图2(a)可见:对比F与PE,最大敏感度系数的因子分别为 β_6 与 β_5 、 β_6 、 β_9 ,即影响F、PE的IEI变化程度最高的因子是地膜分解率与地膜残留率、地膜分解率、土壤养分特点及pH;F和PE这2种地膜的

表 2 不同年份下不同地膜覆盖处理的各指标归一化值 (V_{ij})Table 2 Normalized values of each index of different plastic film mulching treatments in different years (V_{ij})

年份 Year	指标 Index	F	X	PE	CK
2022	地膜单位投入值 C1	0.242 01	0.000 10	0.364 27	1.000 10
	西红柿产量 C2	1.000 10	0.502 15	0.709 80	0.000 10
	覆膜增收值 C3	1.000 10	0.306 24	0.632 12	0.000 10
	地表覆膜失重率 C4	0.439 67	0.000 10	1.000 10	1.000 10
	地膜残留率 C5	0.259 48	0.647 25	0.000 10	1.000 10
	地膜分解率 C6	1.000 10	0.473 91	0.000 10	0.000 10
	增温性能 C7	0.397 76	0.64338	1.000 10	0.000 10
	保墒性能 C8	0.855 24	0.644 96	1.000 10	0.000 10
	土壤养分特点及 pH C9	0.002 12	1.000 10	0.000 10	0.165 27
2023	地膜单位投入值 C1	0.134 92	0.000 10	0.421 88	1.000 10
	西红柿产量 C2	0.750 10	1.000 10	0.500 10	0.000 10
	覆膜增收值 C3	1.000 10	0.624 48	0.691 78	0.000 10
	地表覆膜失重率 C4	0.243 04	0.000 10	0.888 77	1.000 10
	地膜残留率 C5	0.000 10	0.629 52	0.396 08	1.000 10
	地膜分解率 C6	1.000 10	0.473 91	0.000 10	0.000 10
	增温性能 C7	0.528 40	0.285 69	1.000 10	0.000 10
	保墒性能 C8	0.501 59	0.397 12	1.000 10	0.000 10
	土壤养分特点及 pH C9	0.067 89	1.000 10	0.000 10	0.177 53

表 3 评价指标体系各层次判断矩阵的一致性检验结果

Table 3 Consistency test results of judgment matrix at all levels of evaluation index system

判断矩阵 Judgment matrix	$\lambda_{\max}$	CI	CR
$(b_{ij})_{3 \times 3}, i=1,2,3; j=1,2,3$	3.003 0	0.001 5	0.004 8
$(c_{ij})_{3 \times 3}, i=1,2,3; j=1,2,3$	3.036 4	0.001 8	0.035 0
$(c_{ij})_{3 \times 3}, i=4,5,6; j=4,5,6$	3.003 2	0.001 6	0.003 1
$(c_{ij})_{3 \times 3}, i=7,8,9; j=7,8,9$	3.000 9	0.000 4	0.000 9

注： $\lambda_{\max}$ 指的是最大特征根；CI 是一致性指数；CR 是随机一致性比率。

Notes: $\lambda_{\max}$ refers to the maximum eigenvalue. CI is the consistency index. CR is the random consistency ratio.

最大敏感因子均有地膜分解率这个指标,当其变化 10% 时, F 的 IEI 的变化率 $\triangle A$ 为 2.693%, 且远低于 PE 的变化率(24.726%), 表明较 PE 地膜, F 的综合效益在实际应用中更易控制。由图 2(b) 可见: 对比 X 与 PE, 最大敏感度系数分别为 β_2 与 β_5 、 β_6 、 β_9 , 即影响 X、PE 的 IEI 变化程度最高的因子是西红柿

产量与地膜残留率、地膜分解率、土壤养分特点及 pH; 当西红柿产量变化 10% 时, X 的综合效益变化率为 24.899%, 表明较 PE 地膜, X 的综合效益受西红柿产量的影响较大, 而受地膜残留率、地膜分解率、土壤养分特点及 pH 这 3 个因子的影响程度相似且远小于 PE 地膜。

表 4 AHP主观赋权法的主观权重 W_{AHP}

Table 4 Subjective weight calculation of AHP subjective weighting method W_{AHP}

标准层 B Standard layer B	标准层 B 的主观 权重 W_{pj} Subjective weight of standard layer B	方案层 C Scheme layer C	方案层 C 的主观 权重 W_{bi} Subjective weight of Scheme layer C	综合权重 $W_{综合}$ Comprehensive weight	排序 Rank
经济效益 B1 Economic benefit B1	0.355 5	地膜单位投入值 C1	0.390 7	0.138 9	3
		西红柿产量 C2	0.281 5	0.100 1	6
		覆膜增收值 C3	0.327 8	0.116 6	4
技术效益 B2 Technical benefit B2	0.306 2	地表覆膜失重率 C4	0.175 2	0.053 6	8
		地膜残留率 C5	0.153 7	0.047 1	9
		地膜分解率 C6	0.671 1	0.205 5	1
生态效益 B3 Ecological benefit B3	0.338 3	增温性能 C7	0.320 6	0.108 5	5
		保墒性能 C8	0.517 7	0.175 1	2
		土壤养分特点及 pH C9	0.161 7	0.054 7	7

表 5 熵权法的客观权重 ($W_{熵权法}$)

Table 5 Objective weight of entropy weight ($W_{熵权法}$)

评价指标 Evaluation index	信息熵值 e_j Information entropy value e_j	2022 年		2023 年		
		变异系数 g_j Coefficient of variation g_j	$W_{熵权法}$	信息熵值 e_j Information entropy value e_j	变异系数 g_j Coefficient of variation g_j	$W_{熵权法}$
经济效益 B1	0.732 8	0.267 2	0.732 8	0.662 7	0.337 3	0.662 7
技术效益 B2	0.746 8	0.253 2	0.746 8	0.681 7	0.318 3	0.681 7
生态效益 B3	0.738 3	0.261 7	0.738 3	0.735 8	0.2642	0.735 8
地膜单位投入值 C1	0.661 7	0.338 3	0.396 8	0.613 7	0.386 3	0.458 0
西红柿产量 C2	0.765 1	0.234 9	0.275 5	0.765 6	0.234 4	0.277 9
覆膜增收值 C3	0.720 5	0.279 5	0.327 8	0.777 2	0.222 8	0.264 2
地表覆膜失重率 C4	0.750 5	0.249 5	0.228 8	0.698 2	0.301 8	0.273 4
地膜残留率 C5	0.704 9	0.295 1	0.270 6	0.743 9	0.256 1	0.232 0
地膜分解率 C6	0.454 0	0.546 0	0.500 6	0.454 0	0.546 0	0.494 6
增温性能 C7	0.744 9	0.255 1	0.218 1	0.706 4	0.293 6	0.262 8
保墒性能 C8	0.781 5	0.218 5	0.186 8	0.733 7	0.266 3	0.238 3
土壤养分特点及 pH C9	0.304 1	0.695 9	0.595 0	0.442 4	0.557 6	0.499 0

表 6 AHP-熵权法的组合权重 (W_{ij})Table 6 Combination weight of AHP- entropy weight (W_{ij})

评价指标 Evaluation index	2022 年	2023 年
经济效益 B1	0.363 8	0.390 9
技术效益 B2	0.281 1	0.334 9
生态效益 B3	0.321 1	0.307 2
地膜单位投入值 C1	0.455 9	0.520 5
西红柿产量 C2	0.228 5	0.253 9
覆膜增收值 C3	0.316 6	0.281 1
地表覆膜失重率 C4	0.104 1	0.115 3
地膜残留率 C5	0.159 3	0.086 5
地膜分解率 C6	0.683 6	0.805 4
增温性能 C7	0.266 0	0.292 2
保墒性能 C8	0.365 3	0.425 9
土壤养分特点及 pH C9	0.363 4	0.278 6

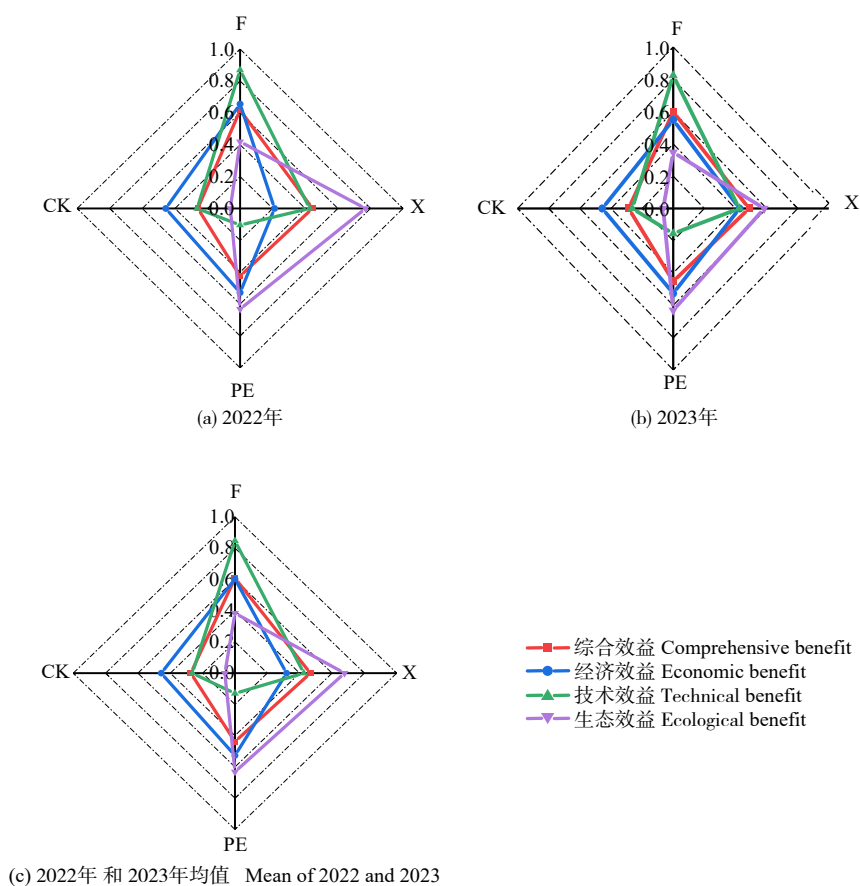


图 1 2022 和 2023 年不同覆膜处理下的经济、技术、生态和综合效益指数以及 2 年平均值的对比

Fig. 1 Comparison of economic, technical, ecological and comprehensive benefit indexes of 2022 and 2023 and their average under different film mulching treatments

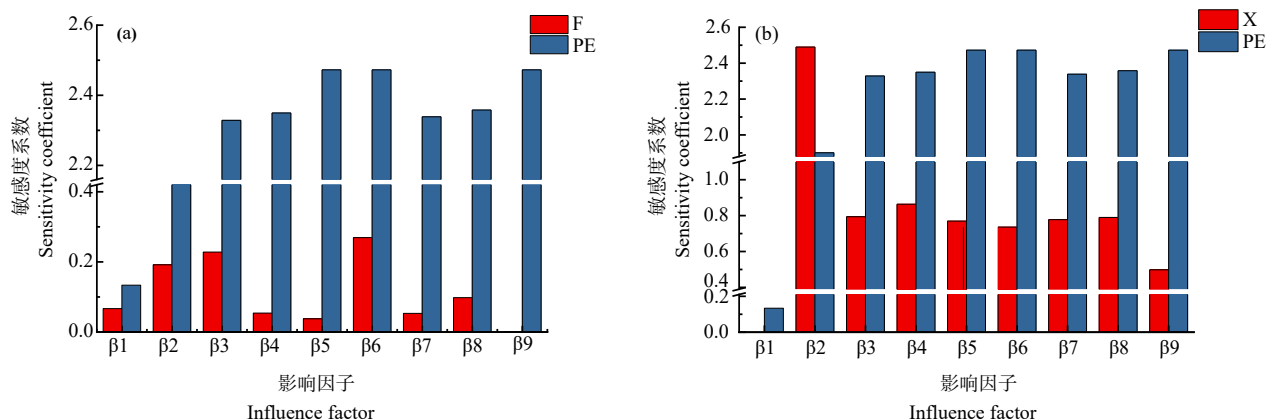


图2 全生物降解地膜F(a)和X(b)与聚乙烯地膜(PE)综合效益的敏感度系数比较

Fig. 2 Sensitivity coefficient comparison of the comprehensive benefit of BDM F (a) and X (b) with PE

4 讨论

研究发现,3种覆膜处理的IEI均高于CK,即覆膜处理具有一定的应用效果。此外,虽然不是所有类型BDM的IEI都高于PE,但若选择合适的BDM(如F),则能显著提高作物产量,同时应用效果显著优于PE,若选择X,则能极大的改善土壤养分特点及pH。此外,权重比值越大说明评价指标越重要^[36]。在这三大效益中,经济效益所占比例略高于技术效益和生态效益,表明了在实际生产生活中,农民采取农业管理措施的决定性因素往往是经济效益^[42]。

首先,从经济效益角度看:与CK处理相比,3种覆膜处理均可以满足作物增产的要求,这与Liu等^[43]研究一致;BDM与普通PE地膜(PE)和未覆膜(CK)相比,X的经济效益指数均低于PE和CK,这与Sun等^[44]、Qin等^[8]研究结果一致。究其原因可能是X膜用量高(约12 kg/hm²)且价格贵(32元/kg),使得X的地膜单位投入值较F、PE分别提高了24%、65%,而X覆盖下西红柿产量又相对较低,因而导致其经济效益指数低。相反,F的经济效益指数均高于PE、CK,主要原因是F膜虽然价格较高(32元/kg)但其用量(约7 kg/hm²)与PE(约6.5 kg/hm²)相差不多,且其增产效果较好,能显著提高西红柿产量^[45-46],而使得其经济效益指数高于PE和CK。

其次,从技术效益角度,总的来看表现为BDM > CK > PE。原因可能是PE不能降解,失重率低、残留率高、短期内分解率接近为0,使得技

术效益指数反而低于CK。3种覆膜处理的技术效益指数以F最高,X其次,PE最低,这与Yin等^[47]研究一致。可能原因如下:一方面是X在覆膜时的开裂程度较高,导致在西红柿生育期间出现大面积裂洞,增温保墒效果差。有研究结果表明在半湿润干旱气候地区覆膜时,降解速率适中的BDM可以高效改善土壤环境^[47]。而F覆膜时的降解速率适中,技术效益最高;另一方面是F在光照、机械穿插、水分等作用下,其分解速率较低,残留在土壤中的地膜碎片或质量较多,F的残留率(22.9%)较X(10.91%)高。然而,经过一年土壤中微生物的分解作用,F的分解率(87.82%)反而远远高于X(41.61%),表明F在地表光照作用下分解较慢,埋入土壤中,在微生物作用下,残膜转化为CO₂和H₂O的速率反而较高,降解趋势明显。

最后,与农民考虑因素不同,政府在解决能否全面推广BDM问题的决定因素往往是考虑生态效益。因此关注地膜的生态效益是必要的,更是重中之重。生态效益指数表现为X > PE > F > CK。与CK相比,3种覆膜处理的增温保墒性能均较高^[48],主要原因是从覆膜到6月21日覆膜处理的增温效果差异明显,但从6月21日到生长期结束,宁夏银北灌区大气温度大幅上升,温度不再是限制西红柿生长的主要因素,随着BDM的降解,地膜表面出现大面积的裂洞,表明地膜的增温性能基本结束^[49],其作用逐渐转变为保墒性能和抑制杂草的功能。同时,由于残膜引起土壤表层的有机质、速效钾减少^[50],会改变土壤特性,阻碍土壤水分渗透,影响土壤吸水,导致土壤二次盐渍化,限制根系发育

和地上作物的生长^[43]。在覆膜种类方面,BDM与PE相比,生态效益指数表现为PE高BDM低。可能原因是随着BDM开裂程度的增加,增温效果降低^[51],因膜被撕裂使得其失去原有的覆盖功能,导致抗穿刺性、机械拉伸性、耐久性、疏水性不足^[52],且对水蒸气的阻隔效果弱于PE^[53]。最后,从综合效益角度来看,BDM的IEI优于PE,这与Chen等^[25]研究一致。综合效益最低的是CK未覆膜对照组,这也与Jia等^[54]和Zhao等^[55]研究一致。

综上,在银北灌区连续2年的试验结果表明,BDM可代替PE在农业中广泛使用。这与刘群^[48]、王斌等^[56]、苏海英等^[57]、向午燕等^[58]的研究结果相吻合。此外,敏感性分析表明,BDM的最大敏感因子与PE地膜不同,主要与地膜种类的特性有关。BDM残留物对根际细菌群落和挥发性化合物的排放有显著影响^[59],且土壤微生物生物量C和N、酶活性和微生物群落多样性与塑料薄膜残留物呈正相关^[3]。BDM残膜停留在土壤中引起土壤孔隙度和空气循环的变化,改变了土壤微生物群落动态和土壤酶活性^[3],还会通过改变土壤结构和特性,抑制作物根系的水平和垂直分布,干扰作物对水分和养分的吸收^[60]。此外,其最终分解产物被植物吸收从根部运输到枝条^[61],再通过消化道危害人体及动物健康。

5 结论与建议

为解决全生物降解地膜能否代替普通PE地膜以解决“白色污染”问题和实现土壤资源的可持续利用,本研究以种植西红柿为例,运用AHP-熵权法确定权重探究全生物降解地膜在宁夏银北灌区应用的综合效果。主要结论如下:

1) 基于AHP—熵权法对全生物降解地膜进行综合效益评价,IEI表现为 $F(0.6075) > X(0.4663) > PE(0.4379) > CK(0.2728)$,其中F、X分别较PE高出38.72%、6.48%,较CK高出122.65%、70.91%。因此在宁夏银北灌区可以使用全生物降解地膜代替普通PE地膜以解决“白色污染”问题和实现土壤资源的可持续利用;

2) 与普通PE地膜相比,全生物降解地膜的主要影响因子为西红柿产量与地膜分解率,需重点关注。

综上,虽然在所有处理中全生物降解地膜的

IEI表现为最优,但其过高的价格,大大增加了农民的前期投入成本,降低了农民的使用意愿。因此,建议降低全生物降解地膜的生产成本以消除其推广瓶颈。

参考文献 References

- [1] Gao X H, Xie D, Yang C. Effects of a PLA/PBAT biodegradable film mulch as a replacement of polyethylene film and their residues on crop and soil environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107053
- [2] 靳拓, 薛颖昊, 张明明, 张明明, 周涛, 刘宏金, 张凯, 习斌. 国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 411-420
Jin T, Xue Y H, Zhang M M, Zhou T, Liu H J, Zhang K, Xi B. Research advances in regulations, standards and recovery of mulch film [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 411-420 (in Chinese)
- [3] Wang J, Lv S H, Zhang M Y, Chen G C, Zhu T B, Zhang S, Teng Y, Christie P, Luo Y M. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils[J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 171-177
- [4] 曹俊豪. 农田残膜与微塑料的分布特征及其对水土环境的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023
Cao J H. Study on the distribution characteristics of residual film and microplastics in farmland and their effects on soil and water environment [D]. Xianyang: northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023 (in Chinese)
- [5] 王海基, 王敏, 王吉亮, 卢勇涛, 营雨琨, 何玉泽. 新疆农田残膜污染治理技术与防控策略[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(4): 166-174
Wang H J, Wang M, Wang J L, Lu Y T, Ying Y K, He Y Z. Control technology and control strategy of residual film pollution in Xinjiang farmland[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(4): 166-174 (in Chinese)
- [6] 赵梓君, 何文清, 尹君华, 刘勤. 基于文献计量分析中国全生物降解地膜研究发展态势[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(4): 57-67
Zhao Z J, He W Q, Yin J H, Liu Q. Development situation analysis of biodegradable mulch film based on bibliometric analysis in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(4): 57-67 (in Chinese)
- [7] 苑鹤, 刘玥, 董红艳, 阎富龙. 我国地膜使用现状及回收再利用研究[J]. *现代农村科技*, 2018(6): 98-99
Yuan H, Liu Y, Dong H Y, Yan F L. Study on the present situation and recovery and reuse of plastic film in China [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2018(6): 98-99 (in Chinese)
- [8] Qin Y Q, Chai Y W, Li R, Li Y W, Ma J T, Cheng H B, Chang L, Chai S X. Evaluation of straw and plastic film mulching on wheat production: A meta-analysis in Loess Plateau of China [J]. *Field Crops Research*, 2022, 275: 108333
- [9] 张旭娟, 李水凤, 许楚楚, 胡美华, 王华英. 全生物降解地膜在秋冬萝卜上的应用[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(5): 772-773
Zhang X J, Li S F, Xu C C, Hu M H, Wang H Y. Application of full biodegradable plastic film on radish in autumn and winter [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(5): 772-773 (in Chinese)

- [10] 汪敏, 徐磊, 严施娜, 蒋希芝, 冯敏, 张晓美, 陈翌, 徐寸发. 设施内 PBAT/秸秆基膜降解特性及对番茄生长的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 184-193
Wang M, Xu L, Yan N N, Jiang X Z, Feng M, Zhang X M, Chen G, Xu C F. Degradation characteristics of PBAT/ straw mulch film and its effect on tomato growth in the facility [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2022, 38(5): 184,193 (in Chinese)
- [11] 汪敏, 徐磊, 严施娜, 蒋希芝, 冯敏. JAAS全生物降解地膜开发及设施内应用探究[J]. 农业工程技术, 2021, 41(22): 17-19,27
Wang M, Xu L, Yan N N, Jiang X Z, Feng M. Development of JAAS biodegradable plastic film and its application in facilities[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2021, 41(22): 17-19, 27 (in Chinese)
- [12] 张霞, 何南. 综合评价方法分类及适用性研究[J]. 统计与决策, 2022, 38(6): 31-36
Zhang X, He N. Study on classification and applicability of comprehensive evaluation methods [J]. *Statistics & Decision*, 2022, 38(6): 31-36 (in Chinese)
- [13] 杨森. 辽宁寒区设施蔬菜化肥减施增效技术模式评价指标体系构建及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020
Yang S. Study on the construction and application of evaluation index system of technical mode of reducing fertilizer application and increasing efficiency for protected vegetables in cold region of Liaoning Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [14] 曹建如. 旱作农业技术的经济、生态与社会效益评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007
Cao J R. Study on evaluation of economic, ecological and social benefits of dry farming technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007 (in Chinese)
- [15] 张艳清. 基于模糊评价法的河南省市域农业循环经济发展水平对比研究[J]. 济源职业技术学院学报, 2023, 22(4): 1-6
Zhang Y Q. Comparative study on the development level of agricultural circular economy in Henan Province based on fuzzy evaluation method [J]. *Journal of Jiyuan Vocational and Technical College*, 2023, 22(4): 1-6 (in Chinese)
- [16] 黄洪金. 层次分析和模糊综合评价方法在公共政策评价中的应用研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014
Huang H J. Research on the application of analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method in public policy evaluation [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014 (in Chinese)
- [17] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 1977, 15(3): 234-281
- [18] Han Y M, Zhou R D, Geng Z Q, Bai J, Ma B, Fan J Z. A novel data envelopment analysis cross-model integrating interpretative structural model and analytic hierarchy process for energy efficiency evaluation and optimization modeling: Application to ethylene industries [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 118965
- [19] 王亚坤. 河北省蔬菜生产投入要素分析与综合效益评价研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016
Wang Y K. Study on input factor analysis and comprehensive benefit evaluation of vegetable production in Hebei Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [20] 朱坤林, 吕夏冰. 基于因子分析法的河南省农业综合生产能力评价[J]. 粮食问题研究, 2024(1): 9-13
Zhu K L, Lv X B. Evaluation of comprehensive agricultural production capacity in Henan Province based on factor analysis [J]. *Grain Issues Research*, 2024(1): 9-13 (in Chinese)
- [21] Hu Y J, Wu L Z, Pan X Q, Wang Z L, Xu X X. Comprehensive evaluation of cloud manufacturing service based on fuzzy theory [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2021, 23(6): 1755-1764
- [22] 刘录祥, 孙其信, 王士芸. 灰色系统理论应用于作物新品种综合评估初探[J]. 中国农业科学, 1989(3): 22-27
Zhu K L, LV X B. Evaluation of comprehensive agricultural production capacity in Henan Province based on factor analysis [J]. *Research on Food issues*, 2024(1): 9-13 (in Chinese)
- [23] 时光新, 王其昌, 刘建强. 变异系数法在小流域治理效益评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6): 47
Shi G X, Wang Q C, Liu J Q. Application of coefficient of variation method in benefit evaluation of small watershed management [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(6): 47 (in Chinese)
- [24] Chen C H. A novel multi-criteria decision-making model for building material supplier selection based on entropy-AHP weighted TOPSIS [J]. *Entropy (Basel, Switzerland)*, 2020, 22(2): 259
- [25] Chen Q, Hu N, Zhang Q, Sun H W, Zhu L Q. Effects of biodegradable plastic film mulching on the global warming potential, carbon footprint, and economic benefits of garlic production [J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 504
- [26] 张雪芳, 刘永胜. 天津市稻渔种养模式综合效益评价指标体系构建研究[J]. 现代农业, 2023, 48(2): 81-87
Zhang X F, Liu Y S. Research on the construction of comprehensive benefit evaluation index system of rice-fishery breeding mode in Tianjin [J]. *Modern Agriculture*, 2023, 48(2): 81-87 (in Chinese)
- [27] 张芮, 李红霞, 高彦婷, 董博, 张海粟, 温文, 王磊. 基于熵权-TOPSIS模型的黄土高原半干旱区玉米覆膜类型综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 74-85
Zhang R, Li H X, Gao Y T, Dong B, Zhang H S, Wen W, Wang L. Comprehensive evaluation of film mulching types of maize in semi-arid area of Loess Plateau based on entropy weight-TOPSIS model [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(1): 74-85 (in Chinese).
- [28] 郭怡婷. 生物可降解和普通地膜对玉米生长及农田温室气体排放的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023
Guo Y T. Effects of biodegradable and common plastic film on maize growth and greenhouse gas emissions from farmland [D]. Xianyang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023 (in Chinese)
- [29] 冷旭, 李仙岳, 郭宇, 丁宗江. DNDC模型和TOPSIS法联合确定生物降解地膜覆盖农田合理施氮量[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 325-332, 341
Leng X, Li X Y, Guo Y, Ding Z J. Determining the reasonable nitrogen application amount in farmland under biodegradable film mulching based on DNDC and TOPSIS models [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 325-332, 341 (in Chinese)
- [30] Li J Z, Liu J L, Zhang L L, Lv H, Cao X Q, Liu Q Q, Cao R, Wang Z Z, Dong Z, Wang K X, Idimesheva O. Response of physiological growth characteristics of rice to different biodegradable mulching and irrigation methods in cold region of Northeast China [J]. *Journal of the ASABE*, 2023, 66(2): 245-252
- [31] 华利民, 刘慧颖, 薛颖, 兰希平, 王艺陶, 蔡广兴. 综合指数法定量评价地膜产品综合效应初探[J]. 中国农学通报, 2022, 38(4): 76-80
Hua L M, Liu H Y, Xue Y H, Lan X P, Wang Y T, Cai G X. Quantitative assessment on comprehensive effects of mulching films by

- integrated evaluation index method [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(4): 76-80 (in Chinese)
- [32] Bo L Y, Mao X M, Wang Y L. Assessing the applicability of biodegradable film mulching in Northwest China based on comprehensive benefits study[J]. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10584
- [33] 王太祥, 高保伟, 张朝辉. 棉花生产中不同类型地膜的综合效益评价: 基于沙湾县四道河子镇的调查[J]. *新疆农垦经济*, 2018(3): 26-30, 38
- Wang T X, Gao B W, Zhang Z H. Comprehensive benefit evaluation on different types of mulching film in cotton production: An investigation of Sidaohazi Town in Shanwan County [J]. *Xinjiang State Farms Economy*, 2018(3): 26-30, 38 (in Chinese)
- [34] Wu X L, Hu F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106243
- [35] Chen Y, Yu J, Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(12): 1582-1591
- [36] 张志成, 刘徐璋, 刘伟. 基于AHP—熵值法的高椅古村品质提升综合评价[J]. *家具与室内装饰*, 2023, 30(9): 124-131
- Zhang Z C, Liu X Z, Liu W. Comprehensive evaluation of the quality improvement of Gaoyi ancient village based on AHP-entropy method[J]. *Furniture & Interior Design*, 2023, 30(9): 124-131 (in Chinese)
- [37] 覃事姪, 尹惠斌. 基于AHP的土地整理综合效益评价实证研究[J]. *河北农业科学*, 2007, 11(2): 93-96
- Qin S Y, Yin H B. Studies on the evaluation of integrated benefit of land arrangements based on AHP[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2007, 11(2): 93-96 (in Chinese)
- [38] Więckowski J, Salabun W. Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 148: 110915
- [39] 郭凯明, 潘珊, 颜色. 新型基础设施投资与产业结构转型升级[J]. *中国工业经济*, 2020(3): 63-80
- Guo K M, Pan S, Yan S. New infrastructure investment and structural transformation [J]. *China Industrial Economics*, 2020(3): 63-80 (in Chinese)
- [40] 董继伟. 装配式建筑全寿命周期成本效益分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019
- Dong J W. Study on the life cycle cost-benefit analysis of assembled buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019 (in Chinese)
- [41] 金龙. 居住建筑中应用装配式钢结构的经济性对比分析[D]. 南京: 东南大学, 2019
- Jin L. Economic comparative analysis of application of assembled steel structure in residential buildings [D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese)
- [42] Zhang D B, Yao P W, Zhao N, Wang Z, Yu C W, Cao Q H, Cao W D, Gao Y J. Responses of winter wheat production to green manure and nitrogen fertilizer on the Loess Plateau [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 361-374
- [43] Liu S W, Jin R X, Li T B, Yang S X, Shen M C. Are biodegradable plastic mulch films an effective way to solve residual mulch film pollution in farmland?[J]. *Plant and Soil*, 2024, 494(1-2): 85-94
- [44] Sun T, Li G, Ning T Y, Zhang Z M, Mi Q H, Lal R. Suitability of mulching with biodegradable film to moderate soil temperature and moisture and to increase photosynthesis and yield in peanut [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 214-223
- [45] Zhang X Y, You S Y, Tian Y Q, Li J S. Comparison of plastic film, biodegradable paper and bio-based film mulching for summer tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 38-48
- [46] 冷旭. 干旱区生物降解地膜覆盖玉米农田追施氮肥制度研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022
- Leng X. Study on the system of topdressing nitrogen fertilizer in maize field covered with biodegradable plastic film in arid area [D]. Hohhot: inner Mongolia Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [47] Yin M H, Li Y N, Fang H, Chen P P. Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 127-137
- [48] 刘群. 生物降解地膜降解过程及其对玉米生长发育和产量的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
- Liu Q. Study on degradation process of biodegradable plastic film and its influence on maize growth and yield [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese)
- [49] 梅丽, 董雯怡, 周继华, 等. 生物降解地膜的性能及在北京鲜食玉米和甘薯生产上的应用[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(10): 54-65.
- Mei L, Dong W Y, Zhou J H, Liu Q, Song H X, Wang J Y. Performance of biodegradable films and their application on fresh corn and sweet potato production in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 54-65 (in Chinese)
- [50] Zhang D Z, Li X R, Quan Z Z, Xu W J, Liu Q. An adaptive hybrid ARQ method for coexistence of ZigBee and WiFi[J]. *International Journal of High Performance Computing and Networking*, 2017, 10(4/5): 310
- [51] Chen N, Li X Y, Šimůnek J, Shi H B, Hu Q, Zhang Y H. Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105116
- [52] Li X L, Zheng G F, Li Z Y, Fu P. Formulation, performance and environmental/agricultural benefit analysis of biomass-based biodegradable mulch films: A review [J]. *European Polymer Journal*, 2024, 203: 112663
- [53] Zhao X, Li F D, Ai Z P, Li J, Gu C K. Stable isotope evidences for identifying crop water uptake in a typical winter wheat-summer maize rotation field in the North China Plain [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 618: 121-131
- [54] Jia H, Wang Z H, Zhang J Z, Li W H, Ren Z L, Jia Z C, Wang Q. Effects of biodegradable mulch on soil water and heat conditions, yield and quality of processing tomatoes by drip irrigation[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(5): 819-836
- [55] Zhao Y M, Zhang F Y, Li L, Yang X J, Zhang F W, Zhao W Y, He Q. Substitution experiment of biodegradable paper mulching film and white plastic mulching film in Hexi oasis irrigation area[J]. *Coatings*, 2022, 12(8): 1225
- [56] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 孙九胜, 王新勇, 槐国龙, 孔立明. PBAT型全生物降解地膜对南疆棉花和玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 148-156
- Wang B, Wan Y F, Wang J X, Sun J S, Wang X Y, Huai G L, Kong L M. Effects of PBAT fully biodegradable plastic film on cotton and maize yield and soil physical and chemical properties in southern Xinjiang [J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2019, 38(1): 148, 156 (in Chinese)
- [57] 苏海英, 宝哲, 刘勤, 董道瑞, 严昌荣, 雷海, 薛颖昊, 徐志宇. 新疆加工番茄应用PBAT全生物降解地膜可行性[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 615-622
- Su H Y, Bao Z, Liu Q, Dong D R, Yan C R, Lei H, Xue Y H, Xu Z Y.

- Degradation of biodegradable mulch film and its effect on the yield of processing tomatoes in the Xinjiang region [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 615-622 (in Chinese)
- [58] 向午燕, 冯晨, 冯良山, 冯良山, 刘琪, 张丽莉, 白伟, 杨宁, 郑家明, 孙占祥. PBAT全生物降解地膜在辽西半干旱区的降解及残留特性[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(12): 45-53
- Xiang W Y, Feng C, Feng L S, Liu Q, Zhang L L, Bai W, Yang N, Zheng J M, Sun Z X. Degradation and residual characteristics of PBAT biodegradable plastic film in semi-arid area in western Liaoning [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(12): 45-53 (in Chinese)
- [59] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, Huerta Lwanga E, Beriot N, Gertsen H, Garbeva P, Geissen V. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1048-1056
- [60] Hu Q, Li X Y, Gonçalves J M, Shi H B, Tian T, Chen N. Effects of residual plastic-film mulch on field corn growth and productivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138901
- [61] Li L Z, Luo Y M, Li R J, Zhou Q, Peijnenburg W J G M, Yin N, Yang J, Tu C, Zhang Y C. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 929-937

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 余奋霞, 硕士研究生, 现就读于宁夏大学生态环境学院材料与化工专业。本科期间获得专业励志奖学金, 二等奖学金2次, 三等奖学金; 硕士期间获得三等奖学金。先后参加国家自然科学基金项目(42277466)、宁夏自然科学基金项目(2023AAC02028)。参加第二十二届中国青年土壤科学工作者暨第十七届中国青年植物营养与肥料科学工作者学术会议并做汇报; 参加第二届《中国环境科学》青年论坛并做墙报。



通讯作者简介: 贺婧, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要从事农业环境与生态、土壤有机碳变化、农业地膜污染防治等研究。主持和完成国家自然科学基金地区基金项目1项; 主持宁夏回族自治区自然科学基金、科技攻关项目、重点研发项目、宁夏回族自治区高教项目10余项; 主持参与各类横向课题10余项。在《环境科学》《土壤通报》《中国土壤与肥料》《干旱地区农业研究》《北方园艺》等期刊发表学术论文20余篇。获得宁夏回族自治区科技进步三等奖一项(排名第二)。