

[效益评价]

农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系研究

文/吴士宾
三峡津蓟（天津）新能源发电有限公司

建立包含目标层、状态层、指标层(一级)和子指标层(二级)的评价模型,涵盖经济、社会、环境效益等方面。运用AHP(层次分析)方法确定各级指标的权重。通过综合权重分析,构建了一整套农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系。为农光互补型光伏发电项目的发展与评价提供全面的分析框架和决策支持。

随着可再生能源的兴起和气候变化问题的日益凸显,太阳能光伏发电技术作为一种清洁、可再生的能源形式备受瞩目^[1]。相较于传统能源形式,太阳能光伏发电具有资源丰富、无噪声和不受地点限制等优势,被广泛认为是缓解气候变化、推动能源转型的重要技术之一^[2]。预计到2030年,中国的光伏装机容量将达到10亿kW。然而,光伏发电在迅速扩张的过程中也面临着一系列挑战,其中之一就是对土地资源的过度占用。

太阳能密度低、占地面积大的特点使得光伏发电项目往往需要大量土地,这对于我国宝贵的耕地资源构成了一定的压力。因此,亟需寻找一种有效的方式来提高太阳能资源利用效率,减少对土地资源的占用,农光互补型光伏发电项目成为备受关注的解决方案之一^[3]。

农光互补型光伏发电项目的核心理念在于将光伏技术与农业生产相结合,通过在农田中搭建光伏发电设备,实现太阳能资源和土地资源的合理利用。这不仅可以提高单位土地面积的利用率,还能为耕作提供一定程度的遮荫效果,有望促进农业生产的提高^[4]。

然而,农光互补型光伏发电项目仍然需要通过科学合理的评估来确保其可持续发展。这种项目的

实施需要考虑诸多因素,包括但不限于光照条件、农业成本、地质踏勘、政策支持、土地租赁和青苗补偿等方面。为了实现项目的长期稳健运营和最大化效益,必须对项目的成本、经济效益、社会效益以及生态效益进行全面评估和分析。只有通过综合性的效益评价,项目才能获得合理的投资决策和可持续的发展路径^[5]。

在这一背景下,本文旨在对农光互补型光伏发电项目的综合效益评价体系进行深入研究。通过构建科学有效的评价指标体系,综合考虑项目的各项成本、收益以及对环境、社会等方面的影响,为农光互补型光伏发电项目提供一套全面可靠的评估方法。

农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型

1. 模型搭建

农光互补型光伏发电项目作为一种重要的能源利用模式备受关注,为了帮助相关决策者更加全面地了解项目的效益情况,从而做出合理的决策,提高项目的经济效益、社会效益和环境效益,实现可持续发展。本文首先对现有文献进行了深入研究,了解到农光互补型光伏发电项目的关键影响因素和评价方法,然后与20余位光伏领域内的专家学者

和企业负责人进行了访谈，从实际操作层面获取了宝贵的经验和建议。在此基础上，本文结合实际情况和理论基础，逐步构建了模型的层级结构，并确定了各层级的评价指标，最终构建一套农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型，该模型如图1所示。

农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型是一种综合评估农业和光伏发电结合项目效益的工具，该评价模型包含四个层级，分别为目标层、状态层、指标层（一级）和子指标层（二级）。该模型涵盖经济、社会和环境效益三个方面，旨在为项目投资决策提供科学依据。

该模型的目标层为农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系，明确对项目整体效益进行全面评估的目标。状态层包括经济效益、社会效益和环境效益三大方向，用于界定评价的主要维度。

在指标层（一级）上，经济效益延伸出盈利能力、偿债能力和运营能力三个主要指标，旨在评估项目的经济可持续性和财务表现。社会效益方面考虑了对经济和居民的影响，突显项目对当地社会的正面影响。而环境效益则包括对环境改善和能源结构的影响，强调项目对生态环境的积极作用。

在子指标层（二级）上，涉及20个具体指标，包括财务净现值、对能源结构的改善等。这些子指标从更具体、更精细的角度对项目效益进行评价，为项目利益方面的深入分析提供支持。

通过该模型的构建和应用，研究者可以全面考量项目各方面的成本和效益，量化和比较项目在经济、社会和环境方面的综合表现。这有助于决策者更准确地评估项目的可行性和潜在收益，从而制定更加科学合理的投资决策。

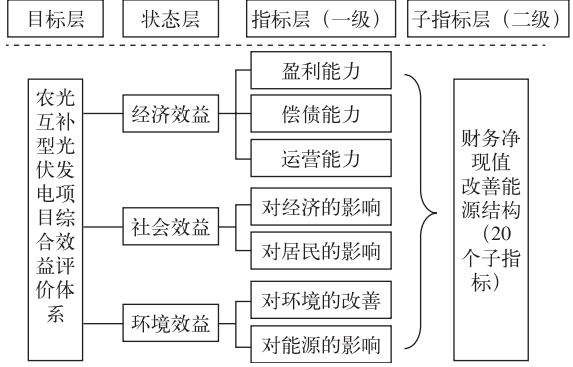


图1 农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型

2. 模型验证

为验证构建的农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型是科学有效的，本文将各指标制作成调查问卷分发给20位光伏领域专家，以评估问卷的效度和信度。

为了评估问卷的效度，本文采用特尔菲法，根据20余位专家的反馈结果，对问卷的合理性和有效性进行定量评估，见表1。可以发现问卷在第一轮和第二轮调查中得到相当高的认可度和接受率，这表明被调查者普遍认为问卷设计合理、有效，并能够全面有效地实现农光互补型光伏发电项目综合效益评价的目的。

此外，本文还通过克隆巴赫 α 系数法对问卷信度进行检验。结果显示状态层指标的 α 值为0.84，指标层一级指标的 α 值为0.88，指标层二级指标的 α 值为0.88，这表明这些指标在问卷中的可靠性较高。

表1 问卷效度评价结果（N=20）

专家 问卷	非常合理		合理		一般		不合理		有效率 (%)
	频数	百分比 (%)	频数	百分比 (%)	频数	百分比 (%)	频数	百分比 (%)	
第一轮	8	40	10	50	1	5	1	5	90
第二轮	8	40	9	45	2	10	1	5	85

状态层指标重要性评价

1. AHP确定状态层指标权重

AHP（层次分析法）是一种用来解决复杂决策问题的定量分析方法，可帮助决策者根据多个准则和因素的重要性进行判断和决策，在构建农光互补型光伏发电项目综合效益评价模型的过程中，AHP被本文用来确定各层级指标的重要性评价，本文以状态层指标为例，指标层一级指标和指标层二级指标则由于篇幅原因不再进行展开。

首先构建关联矩阵，根据1~9及其倒数标度法，采用两两比较法构造出一级指标的判断矩阵，见表2。

表2 状态层指标判断矩阵

	A ₁ 经济效益	A ₂ 社会效益	A ₃ 环境效益
A ₁ 经济效益	1	7	5
A ₂ 社会效益	1/7	1	1/3
A ₃ 环境效益	1/5	3	1

随后采用方根法计算判断矩阵的特征向量和最大特征根, 计算过程如下。

计算各行元素之积

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

计算式(1)的 n 次方根

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

对 $\overline{W} = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \overline{W}_3, \dots, \overline{W}_n]^T$ 归一化处理

$$W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j} \quad (3)$$

确定特征向量

$$W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]^T \quad (4)$$

最后计算最大特征根为

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

式中, $(AW)_i$ 为示向量的第 i 个元素; A 为判断矩阵。

则

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = 3.0598 \quad (6)$$

计算判断矩阵一致性指标

$$C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = 0.0299 \quad (7)$$

随机一致性指标见表3。

表3 随机一致性指标

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

当 n 为3时, R_i 为0.58, 带入可知

$$C_R = \frac{C_i}{R_i} = 0.0516 < 0.1 \quad (8)$$

式中, C_R 代指 CR (一致性比率); C_i 代指 CI (一致性指标); R_i 代指 RI (随机一致性指标)。

即判断矩阵满意, 其特征向量作为权向量。其结果见表4。

表4 状态层指标权重

状态层指标	权重 (保留三位小数)	排序
A_1 经济效益	0.731	1
A_2 社会效益	0.080	3
A_3 环境效益	0.189	2

2. 状态层指标权重分析

本文通过AHP层次分析法确定了状态层指标

的权重, 根据表5结果显示, 经济效益在整体评价中排名第一, 环境效益排名第二, 社会效益排名第三。

经济效益在农光互补型光伏发电项目中的重要性最高, 其权重为0.731。经济效益的高权重反映了投资回报率、财务健康和运营效率等因素在项目决策中的显著影响, 农光互补型光伏发电项目作为一个结合农业和光伏发电的新兴模式, 其经济效益对于项目的可持续发展和商业成功至关重要。

环境效益被评定为第二重要的因素, 其权重为0.189。这表明, 在考虑到项目的社会责任和环境影响时, 决策者认为项目对环境的改善和对能源结构的促进具有重要意义, 环境效益的评价将涉及到减少碳排放、资源可持续利用和生态环境保护等方面。

社会效益被赋予最低的权重, 为0.080。社会效益评估的内容通常涉及项目对当地居民生活和社会结构的影响, 包括就业机会、社区发展和生活质量等, 尽管社会效益在项目实施过程中也具有一定重要性, 但相较于经济和环境效益, 其影响度较低。

农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系

本文用AHP来确定各层级指标的重要性评价, 将状态层指标的权重赋值与指标层一级指标的权重赋值及指标层二级指标的权重赋值进行连续乘积, 可得到其最终综合权重, 并依据其综合权重对所有指标进行排序, 得到了详细的农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系, 见表5。

在农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系中, 综合权重分析结果显示, 在所有的指标层二级指标中, 财务净现值排名第1, 而使用清洁能源带来的声誉排名最低, 排名第20。这表明在决策过程中, 经济效益远远超过了声誉带来的影响。

财务净现值作为一个核心经济指标, 被赋予最高的重要性。这是因为财务净现值直接反映项目在未来时间内所带来的现金流量与投资成本之间的关系, 是衡量项目盈利能力和财务健康状况的重要指标。在项目决策中, 经济效益是首要考虑的因素, 只有具备良好的盈利能力和回报率, 项目才有可持续发展的基础。因此, 财务净现值在AHP分析中被赋予最高的权重, 排名第一。

表5 农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系

状态层 指标	权重（保留 三位小数）	排 序	指标层一级 指标A	权重（保留 三位小数）	指标层 内排序	指标层二级指标B	权重（保留 三位小数）	指标层 内排序	综合 权重	总排 序
经济效益	0.731	1	盈利能力	0.674	1	财务净现值	0.482	1	0.237	1
						内部收益率	0.079	4	0.039	8
						投资回收期	0.052	5	0.026	11
						总资产报酬率	0.230	2	0.113	3
						净资产收益率	0.157	3	0.077	5
			偿债能力	0.226	2	资产负债率	0.857	1	0.142	2
						流动比率	0.143	2	0.024	12
			运营能力	0.100	3	总资产周转率	0.833	1	0.061	6
						流动资产周转率	0.167	2	0.012	14
社会效益	0.080	3	对经济的影响	0.833	1	对经济发展的带动	0.167	2	0.011	15
						对就业情况的促进	0.833	1	0.056	7
						使用清洁能源带来的声誉	0.072	3	0.001	20
			对居民的影响	0.167	2	居民生活质量的提高	0.650	1	0.009	16
						居民公众意识的提高	0.278	2	0.004	19
环境效益	0.189	2	对环境的改善	0.833	1	节能减排	0.609	1	0.096	4
						生态环境改善	0.098	3	0.015	13
						植被保护	0.244	2	0.038	9
						环境质量的影响	0.049	4	0.008	17
			对能源的影响	0.167	2	地区资源的合理利用	0.167	2	0.005	18
						改善能源结构	0.833	1	0.026	10

相比之下，使用清洁能源带来的声誉在AHP分析中排名较低，可能是专家认为声誉对项目整体综合效益的影响相对较小，且其影响较为难以量化，难以直接转化为经济效益，因此在AHP分析中未能获得高排名。

结束语

作为世界上太阳能发电量最高的国家和最大的农业生产国，中国尤其适合发展农光互补系统。为了构建农光互补型光伏发电项目综合效益评价体系，本文通过整合文献调研和专家访谈的结果，建立了以经济、社会和环境效益为核心的评价模型，该评价模型包含四个层级，分别为目标层、状态层、指标层（一级）和子指标层（二级）。随后本文运用AHP方法确定各级指标的重要性，结果显示经济效益在评价中占据首要地位，环境效益和社会效益紧随其后。最后通过综合权重分析，进一步揭示20个子指标中的关键因素，发现财务净现值排第1，使用清洁能源带来的声誉排第20。本文构建了一整套详细可操作的农光互补型光

伏发电项目综合效益评价体系，为农光互补型光伏发电项目的评价提供了系统性研究和决策参考，为促进可再生能源与农业领域的融合发展贡献了新的理论和实践经验。EA

（收稿日期：2024-06-27）

参考文献

[1] 窦爽，李俊志，王晓东，等．辽西地区光伏种植生产模式可行性分析——以高粱为例[J]．中国种业，2024(3)：9-14．

[2] 戚浩明．农光互补光伏发电项目施工研究[J]．电气技术与经济，2024(2)：118-121．

[3] 冯亚娟，李聪．基于社会网络分析法的农光互补项目利益相关方研究[J]．项目管理技术，2024，22(2)：93-98．

[4] 刘小磊．我国农光互补产业发展现状与展望[J]．产业创新研究，2023(22)：65-67．

[5] 鲍恩财，瞿文卉，吴翠南，等．江苏省光伏农业产业发展现状与对策[J]．新能源科技，2023，4(2)：53-60．