DOI: 10.16843/j.sswc.2025073
引用格式: 杨晓娟, 吕超, 王伟, 等. 基于 DEMATEL-ANP 法的生产建设项目水土保持效果评价 [J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(5): 78 − 89. YANG Xiaojuan, LÜ Chao, WANG Wei, et al. Evaluation of soil and water conservation effect in production and construction projects based on DEMATEL-ANP method[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(5): 78 − 89.

基于 DEMATEL-ANP 法的生产建设项目水土保持效果评价

杨晓娟[1,2], 吕 超[1,2†], 王 伟[1,2], 张 岩[3], 王君诺[1,2]
(1. 水发规划设计有限公司, 250000, 济南; 2. 山东省湖泊流域管理信息化工程技术研究中心, 250000, 济南; 3. 山东新汇建设集团有限公司, 257000, 山东东营)

摘要: 滞洪区生产建设项目水土保持效果直接影响防洪体系效果的发挥。对滞洪区生产建设项目中的水土保持效果进行全面评估, 识别并计算关键影响因素及其权重, 可有效提高水土保持决策及方案编制的科学性和实用性。以山东省湖东滞洪区建设工程为研究评价对象, 选用决策实验室分析法(DEMATEL)−网络分析法(ANP), 建立包含 6 个准则层、16 个指标层的网络分析结构, 构建生产建设项目水土保持效果评价指标体系。评价结果显示, 水土流失治理度、土壤流失控制比、流失强度等级直接影响整体评价结果; 严重危害事件发生的次数、乱倒乱弃或顺坡溜渣的数量扩大扰动面积的数量及临时措施落实不及时、不到位的数量应优先作为决策的核心依据; 山东省湖东滞洪区项目 2019—2022 年水土保持效果综合评价指数分别为 0.749、0.576、0.823 和 0.712, 水土保持效果表现依次为良、中、优、良, 总体表现良好。山东省湖东滞洪区工程建设过程中水土保持工作总体表现良好, 具有较好的水土保持效益。研究结果可为同类型生产建设项目的水土保持效果评价提供参考。

关键词: 水土保持效果评价; 滞洪区; 决策实验室分析法; 网络分析法; 生产建设项目
中图分类号: S157.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-2673(2025)05-0078-12

Evaluation of soil and water conservation effect in production and construction projects based on DEMATEL-ANP method

YANG Xiaojuan[1,2], LÜ Chao[1,2], WANG Wei[1,2], ZHANG Yan[3], WANG Junnuo[1,2]
(1. Shuifa Plannning and Design Co., Ltd., 250000, Jinan, China; 2. Shandong Lake Basin Management & Informationizing Engineering Technology Research Center, 250000, Jinan, China; 3. Shandong Xinhui Construction Group Co., Ltd., 257000, Dongying, Shandong, China)

Abstract: [**Background**] The effect of soil and water conservation of production and construction projects in flood detention area directly affects the effect of flood control system. The traditional evaluation of soil and water conservation effectiveness is faced with problems such as non-linear correlation between indicators and unreasonable weight distribution. The error rate of the combined method of DEMATEL and ANP in complex system evaluation is lower than that of the traditional model. The comprehensive evaluation of soil and water conservation benefits of production and construction projects is carried out, and the key influencing factors and their weights are identified,

收稿日期: 2025−04−14 **修回日期**: 2025−08−08
项目名称: 山东省重点研发计划项目“黄河流域多尺度水网构建与生态修复技术研究及应用示范”(2023CXGC010905); 水发设计集团科研项目“基于聚类分析和多目标优化决策模型的生产建动设项目水土保持监测方法体系构建研究”(ZLKT2024-06)

第一作者简介: 杨晓娟(1987—), 女, 硕士, 高级工程师。 主要研究方向: 水土保持。 E-mail: sxwncc@126.com
† **通信作者简介**: 吕超(1985—), 男, 本科, 高级工程师。主要研究方向: 水土保持设计, 监测等。 E-mail: 499981420@qq.com

which can effectively improve the scientific and practical nature of soil and water conservation decision-making and programming. [**Methods**] Taking the project of Hudong flood detention area in Shandong province as the research object, the DEMATEL method was used to determine the influence relationship between the index factors, and the ANP method was used to determine the comprehensive weight of the evaluation index. Based on the evaluation of soil and water conservation effect of fuzzy comprehensive evaluation, a network analysis structure including 6 criterion layers and 16 index layers is established, and the evaluation index system of soil and water conservation benefit of production and construction projects is constructed. [**Results**] 1) The soil and water loss intensity grade (c_3), soil loss control ratio (c_2) and soil and water loss conservation ratio (c_1) have high centrality, which are 2.262 0, 2.276 and 2.455 respectively, which directly affect the overall evaluation results. 2) The ANP weights of the number of occurrences of serious hazard events (h_2), the number of disorderly abandoned or downhill slag (w_2) and the number of temporary measures implemented untimely and inadequately (m_3) are 0.168, 0.141, and 0.123, which should be given priority as the core basis for decision-making. 3) Waste residue protection ratio (w_1), vegetation coverage ratio (m_4), forest and grass vegetation restoration ratio (m_5) are important indicators to connect the top and bottom factors, and have the function of connecting the preceding and the following in the system. 4) The comprehensive evaluation indices of soil and water conservation effectiveness for the Hudong Flood Detention Area Project in Shandong province from 2019 to 2022 were 0.749, 0.576, 0.823, and 0.712, respectively, with the effectiveness rated as good, moderate, excellent, and good, indicating an overall favorable performance. [**Conclusion**] The soil and water conservation measures implemented during the construction of the Hudong Flood Detention Area Project in Shandong province have demonstrated commendable performance, yielding significant ecological and hydrological benefits. The DEMATEL-ANP integrated evaluation methodology proves effective in assessing such production-construction projects, as it not only elucidates the interdependent relationships among evaluation indicators but also substantially mitigates the subjective biases inherent in conventional analytic network process applications within decision-making frameworks. The research results can provide reference for the evaluation of soil and water conservation effect of the same type of production and construction projects.

Keywords: effect evaluation of soil and water conservation; flood detention basin; decision-making trial and evaluation laboratory; analytic network process; production and construction projects

作为水土保持综合效益评价的基础，水土保持效果评价方法经历了从单一措施评价向多维度模型综合分析的范式转变[1]。进入 21 世纪以来，生产建设项目数量骤然增长，针对水土流失所日益凸显的环境和生态问题，前人先后提出专家咨询法、文献频数法、主成分分析法等赋予基于层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）构建的指标体系以指标权重[2−3]。张志华等[4] 基于 2 年的现场观测结果对深圳市在建道路工程、河道整治工程中不同临时水土保持措施的效果进行了分析；闫超等[5] 采用层次分析法和熵权法对江苏省输变电类生产建设项目从水土流失基本情况和水土保持防治效果 2 方面建立了评价指标体系。但此类方法存在指标间非线性关联及权重分配不合理等问题，如 AHP 法假设指标相互独立，未能充分考虑水土保持系统中工程措施、植被恢复及土壤理化性质等因素之间的相互影响和协同作用[6]。

Saaty 等[7] 提出的网络分析法（analytic network process, ANP）通过构建网络化权重模型，整合指标间的依赖关系，可有效解决传统 AHP 模型中“措施−效果”元素间多维反馈关系的局限性[8]；而决策实验室分析法（decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL）能通过影响矩阵量化指标间的因果强度，科学地处理复杂系统中各因素间复杂的影响关系[9]，从而识别关键驱动因素，目前在一些领域中已得到广泛应用。DEMATEL 与 ANP 的融合，为解决上述问题提供新路径，前者通过因果图量化指标间直接/间接影响强度，后者借助超矩

阵实现动态权重迭代。高博文等[10]基于网络分析法构建了水库供水工程的多维度风险评价流程，袁剑波等[11]开发出公路桥梁施工安全风险动态评估体系，吕淑然等[12]将 DEMATEL 与 ANP 方法相结合用于确定评价指标权重，实现了对大型泵站运行安全的综合评价。实证研究表明，该组合方法在复杂系统评价中的误差率较传统模型降低。对此，本研究通过集成 DEMATEL 与 ANP 方法建立多层次评价指标体系，并量化施工扰动、植被恢复等的非线性耦合关系，实现定量与定性分析的有效融合。

然而，现有生产建设项目水土保持效果评价多集中于水电站建设、输变电工程、道路建设等项目，可严重影响防洪体系效益发挥的蓄滞洪区水土保持效果关注较少。滞洪区多地势平坦、水土保持工作基础较差，开发建设项目兴建产生的大量弃土弃渣汇入合流后会提抬高河床，降低河道的行洪排洪能力，严重影响防洪体系效益的发挥[13]。湖东滞洪区作为山东省防洪体系的重要组成部分，其水土保持效果直接影响区域生态安全与水资源可持续利用。本研究以该工程为对象，构建包含 3 层 16 个指标的水土保持效果评价模型，同时量化指标间的依存关系，揭示滞洪区生产建设项目水土保持效果的多维度作用机制，以期为滞洪区生产建设项目水土保持效果评估提供科学决策依据。

1 材料与方法

1.1 评价对象及数据获取

山东省湖东滞洪区位于山东省南部，属于南四湖防洪工程体系的核心组成部分。工程涉及济宁市微山县、邹城市以及枣庄市滕州市、薛城区等 4 个县(市、区) 209 个行政村，地处山前冲洪积平原地貌区，水系网络复杂，在鲁南苏北区域防洪体系中承担战略支点作用。滞洪区总面积达 252.69 km^2，总滞洪容量 3.72 亿 m^3，方案设计防治责任范围为 262.64 hm^2，水土流失背景值为 400 t/(km^2·a)。工程采用滨湖洼地滞蓄技术，通过临时调蓄南四湖洪水，减轻下游中运河、骆马湖防洪压力，确保鲁南、苏北防洪安全，是保证东调南下工程发挥整体效益的重要工程项目，充分彰显我国新时代“人水和谐”治水理念与生态文明建设要求。

本研究数据来自于山东省湖东滞洪区建设工程的水土保持监测单位水发规划设计有限公司，包括监测季报、年报、总结报告、验收报告和遥感影像等资料。其中，监测季报自 2019 年第 4 季度始、2022 年第 4 季度止，共 13 期；监测年报起止时间为 2019—2022 年，共 4 期；总结报告、验收报告各 1 份，原件在中华人民共和国水利部官网审批公告(http://www.mwr.gov.cn/fw/spgg/)和水土保持公示网(http://yanshou100.com)页面提供，影像资料包含安全楼和安全台、道路和桥梁、堤防及取土场在施工前、施工间的信息，以照片形式在上述各报告内呈现。

1.2 水土保持效果评价指标体系构建

本研究基于 GB/T 50434—2018《生产建设项目水土流失防治标准》、SL 773—2018《生产建设项目土壤流失量测算导则》的技术要求，结合山东省湖东滞洪区内的实地调研数据，运用水土流失成因理论系统梳理影响水土保持效果的各层级因素，采用德尔菲法确定候选指标，最终确立涵盖扰动范围控制、表土剥离保护、弃渣堆置保护、水土流失控制、水保措施落实、水土流失危害 6 个维度的 16 项评价指标，构建山东省湖东滞洪区水土保持效果评价指标体系。

1.3 DEMATEL 法确定指标因素间影响关系

DEMATEL 是一种基于专家知识的系统结构分析方法，通过构建标准化直接影响矩阵来量化复杂系统要素间的交互作用强度[14]。这种将专家定性判断转化为定量分析的研究范式，特别适用于揭示复杂系统中各要素的因果关联与影响层级，为系统决策提供数据支撑。主要包含因素提取与定义、因素关系逻辑预设、专家评分与标度设计、矩阵规范化处理、矩阵极限运算和关键指标计算 6 个步骤。在本研究中该方法的实现采用山西元决策软件科技有限公司提供的 YAANP 软件完成。其中，本研究选用 0 ~ 4 标度 Likert 量表采集 k 位专家对指标间影响程度的初始直接影响矩阵 A_k(0、1、2、3、4 分别代表完全无影响、较小影响、一般影响、较大影响、非常大影响)，经算术平均处理得到直接影响矩阵，再通过极值标准化公式进行归一化转换后，以上结果计算可得到综合影响矩阵[15]为

$$B = \frac{A}{\max \sum_{j=1}^{n} a_{ij}}; \quad (1)$$

$$Q = B(B-I)^{-1}。 \quad (2)$$

式中：B 为经标准化后的直接影响矩阵；A 为直接影响矩阵，$A = [a_{ij}]$；a_{ij} 为矩阵中第 i 行第 j 列的值；n 为选取指标的顺序；Q 为综合影响矩阵；I 为单位矩阵；量纲均为 1。

指标的中心度(d_i+e_j)与原因度(d_i-e_j)的计算式分别为

$$d_i=\left(\sum_{i=1}^{n}q_{ij}\right)_{n\times 1}; \tag{3}$$

$$e_j=\left(\sum_{i=1}^{n}q_{ij}\right)_{1\times n}。 \tag{4}$$

式中：$i=j$，影响度 d_i 为 Q 中第 i 行之和；被影响度 e_j 为 Q 中第 j 列之和；$Q=「q_{ij}」$，q_{ij} 为综合影响矩阵中第 i 行第 j 列的值；量纲为 1。中心度(prominence)表征要素在系统中的重要性程度，数值越大表明其核心地位越显著；原因度(causal relationship)反映要素的因果属性，正值代表驱动性影响，负值则体现受动性特征。二者共同构成 DEMATEL 方法的量化分析基础。

1.4　ANP 法确定评价指标的综合权重

ANP 作为 AHP 的拓展形式，通过引入网络化结构模型并构建包含反馈机制的综合影响矩阵，有效解决了传统 AHP 方法在指标独立性假设方面的理论局限[16]，实现了对复杂系统中要素间交互作用的量化表征。但其存在主观性较强、精度不足和计算复杂等问题[17]，需结合他评价方法使用，以弥补单一方法的应用缺陷。

ANP 的权重计算建立在对系统要素间交互作用的量化建模基础上，该方法主要包括构建双层控制结构、构造超矩阵、计算加权超矩阵与极限矩阵、提取综合权重 4 个步骤，实现方法同 DEMATEL 法。本研究首先通过专家问卷调查获取九级标度判断矩阵(表 1)，经一致性检验后构建超矩阵，进而计算其极限形式以获得稳态权重向量，最终极限超矩阵的任一列向量即为各指标权重。其中，控制层准则采用等权重假设，网络层指标权重通过马尔可夫链的稳态求解过程确定。

表 1　九级标度法

Tab. 1　Nine-level scaling method

标度 Scale	描述 Description
1	i与j同等重要 i and j are equally important
3	i比j稍重要 i is slightly more important than j
5	i比j明显重要 i is significantly more important than j
7	i比j强烈重要 i is strongly more important than j
9	i比j极端重要 i is extremely more important than j
2、4、6、8	介于相邻标度之间 Between adjacent scales
各标度倒数 Reciprocal of each scale	i与j交换位置 Exchange positions of i and j

传统 DEMATEL 方法在构建综合影响矩阵时采用等权重假设(即各指标初始权重相同)，这在实际复杂系统分析中可能造成偏差。为提升模型精度，本研究将 DEMATEL 方法获得的标准化综合影响矩阵与 ANP 方法计算得到的指标权重向量结合，引入权重修正因子，既可保留 DEMATEL 对指标间影响关系的刻画能力，又能融入 ANP 对指标重要性的差异化评估。混合权重的生成则采用线性代数中常用的 Hadamard 乘积运算：

$$Z=U+TU=(1+T)U。 \tag{5}$$

式中：Z 为权重修正因子；T 为标准化综合影响矩阵；U 为指标权重向量；量纲均为 1。

1.5　基于模糊综合评价的水土保持效果评价

本研究基于行业规范和既有研究成果[18]，建立生产建设项目水土保持效果的多级评价体系。该体系依据综合评价指数划分水土保持效果为优(0.8 ~ < 1.0)、良(0.6 ~ < 0.8)、中(0.4 ~ < 0.6)、差(0.2 ~ < 0.4)和极差(0 ~ < 0.2)共 5 级，对各项评价指标进行系统分级，共确立 16 个具有明确识别特征的评估指标，既包含可量化的客观参数，也涵盖定性描述的评价维度(表 2)。其中，定性指标通过德尔菲专家咨询法确定，定量指标由现场监测资料统计分析获得。将指标值带入对应的隶属度函数计算出指标的隶属度，A ($k=1$)、B ($k=2$)、C ($k=3$)、D ($k=4$)、E ($k=5$) 5 个等级(k)的指标隶属度计算公式分别为[19]：

$$H(x)=\begin{pmatrix}1 & x\leqslant s_k\\ \dfrac{s_{k+1}-x}{s_{k+1}-s_k} & ,\ s_k<x<s_{k+1}\\ 0 & x\geqslant s_{k+1}\end{pmatrix}; \tag{6}$$

$$H(x)=\begin{pmatrix}\dfrac{x-s_{k-1}}{s_k-s_{k-1}} & s_{k-1}<x<s_k\\ \dfrac{s_{k+1}-x}{s_{k+1}-s_k} & ,\ s_k<x\leqslant s_{k+1}\\ 0 & x\leqslant s_{k-1},x>s_{k+1}\end{pmatrix}; \tag{7}$$

$$H(x)=\begin{pmatrix}0 & x\leqslant s_{k-1}\\ \dfrac{x-s_{k+1}}{s_k-s_{k+1}}, & s_{k-1}<x\leqslant s_k\\ 1 & x>s_k\end{pmatrix}。 \tag{8}$$

式中：$H(x)$为各指标隶属度函数表达式；x 为指标的实测值；s_k ($k=1, 2, 3, 4, 5$)为指标对应的等级值；量纲均为 1。

计算得到指标隶属度后，构建评价矩阵。考虑到水土保持作用的整体性特征，选择加权平均模型进行多指标合成的综合评价矩阵计算：

表 2 水土保持效果评价指标体系及分级标准

Tab. 2 Soil and water conservation effect evaluation indicator system and grading standards

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	指标释义 Indicator definition	评价等级 Evaluation level					属性 Attribute
				优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Poor	极差 Very poor	
水土保持工程实施成效 Implementation effectiveness of soil and water conservation engineering	扰动范围控制 Disturbed range control D	扰动土地率 Disturbed land ratio d_1/%	（扰动土地面积/征占地总面积）×100%（Disturbed land area/Total area of land requisition）× 100%	⩽ 1	1 ~ < 1.1	1.1 ~ < 1.2	1.2 ~ 1.3	⩾ 1.3	定量 Quantitative
		扩大扰动面积的数量 Number of expanded disturbance areas d_2	擅自扩大施工扰动面积达到1 000 m^2以上，存在1处计1处 Unauthorized expansion of the construction-disturbed area ⩾ 1,000 m^2, record one location per presence	0	1	2,3	4,5	> 5	定量 Quantitative
	表土剥离保护 Surface soil stripping and protection S	表土剥离保护未落实的数量 Number of unimplemented surface soil stripped protection s_1	表土剥离保护措施未实施面积达到1 000 m^2以上，存在1处计1处 Unimplemented area of surface soil stripping and protection measures ⩾ 1,000 m^2, record one location per presence	0	1	2,3	4,5	⩾ 6	定量 Quantitative
		表土保护率 Surface soil protection ratio s_2/%	项目水土流失防治责任范围内保护的表土数量占可剥离表土总量的百分比 Percentage of protected surface soil quantity to total strippable surface soil volume within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project	⩾ 97	95 ~ < 97	90 ~ < 95	85 ~ < 90	< 85	定量 Quantitative
	弃渣堆置保护 Waste slag stacking and protection W	渣土防护率 Waste residue protection ratio w_1/%	项目水土流失防治责任范围内采取措施实际挡护的永久弃渣、临时堆土的数量占永久弃渣和临时堆土总量的百分比 Percentage of permanent waste slag and temporary stockpiled soil actually protected by implemented measures within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project to the total quantity of permanent waste slag and temporary stockpiled soil	⩾ 95	90 ~ < 95	85 ~ < 90	80 ~ < 85	< 80	定量 Quantitative
		乱倒乱弃或顺坡溜渣的数量 Number of disorderly abandoned or downhill slag w_2	施工中乱倒乱弃或顺坡溜渣，存在1处计1处 Disorderly abandoned or downhill slag during construction, record one location per presence	0	1	2	3	⩾ 4	定量 Quantitative
	水土流失控制 Soil and water loss control C	水土流失治理度 Soil and water loss conservation ratio c_1/%	项目水土流失防治责任范围内水土流失治理达标面积占水土流失总面积的百分比 Percentage of the area where soil and water loss has been controlled to meet standards within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project, relative to the total soil and water loss area	⩾ 95	90 ~ < 95	85 ~ < 90	80 ~ < 85	< 80	定量 Quantitative
		土壤流失控制比 Soil loss control ratio c_2/%	项目水土流失防治责任范围内容许土壤流失量与治理后的平均土壤流失量之比 Ratio of soil loss tolerance to average soil loss after treatment within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project	⩾ 1.0	0.9 ~ < 1.0	0.8 ~ < 0.9	0.7 ~ < 0.8	< 0.7	定量 Quantitative
		流失强度等级 Soil and water loss intensity grade c_3	判断是否发生明显水土流失，根据《土壤侵蚀分类分级标准》划分强度等级 Determine whether significant soil and water loss has occurred, and classify the intensity levels according to the SL 190-2007 “Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion”	微度 Slight	轻度 Mild	中度 Moderate	强度 Severe	极强烈—剧烈 Extreme and Violent	定性 Qualitative

续表 2　Continued to Tab. 2

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	指标释义 Indicator definition	评价等级 Evaluation level					属性 Attribute
				优 Excellent	良 Good	中 Moderate	差 Poor	极差 Very poor	
水土保持工程实施成效 Implementation effectiveness of soil and water conservation engineering	水土保持措施落实 Implementation of soil and water conservation measures M	工程措施落实不及时、不到位的数量 Number of engineering measures implemented untimely and inadequately m_1	水土保持工程措施(拦挡、截排水、工程护坡、土地整治等)落实不及时、不到位，存在1处计1处 Engineering measures of soil and water conservation (e.g., barrier works, intercepting and drainage, engineering slope protection, land consolidation and rehabilitation) have not been fully implemented in a timely and adequate manner, record one location per presence	0	1,2	3,4	5,6	> 6	定量 Quantitative
		植物措施落实不及时、不到位的数量 Number of vegetative measures implemented untimely and inadequately m_2	植物措施未落实或已落实的成活率、覆盖率不达标面积达到1 000 m^2以上，存在1处计1处 Area with vegetation measures either unimplemented or implemented but failing to meet the survival rate and coverage rate standards exceeds 1,000 m^2, record one location per presence	0	1,2	3,4	5,6	> 6	定量 Quantitative
		临时措施落实不及时、不到位的数量 Number of temporary measures implemented untimely and inadequately m_3	水土保持临时措施(拦挡、排水、苫盖、植草、限定扰动范围等)落实不及时、不到位，存在1处计1处 Temporary soil and water conservation measures (including barriers, drainage, covering, grass planting, restriction of disturbance areas, etc.) not implemented in a timely or adequate manner, record one location per presence	0	1,2	3,4	5,6	> 6	定量 Quantitative
		植被覆盖率 Vegetation coverage ratio m_4/%	项目水土流失防治责任范围内林草类植被面积占总面积的百分比 Percentage of forest and grass vegetation coverage to the total area within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project	≥ 95	90 ~ < 95	85 ~ < 90	80 ~ < 85	< 80	定量 Quantitative
		林草植被恢复率 Forest and grass vegetation restoration ratio m_5/%	项目水土流失防治责任范围内林草类植被面积占可恢复林草植被面积的百分比 Percentage of forest and grass vegetation area to the restorable forest and grass vegetation area within the scope of responsibility for soil and water loss control of the project	≥ 95	90 ~ < 95	85 ~ < 90	80 ~ < 85	< 80	定量 Quantitative
	水土流失危害 Soil and water loss hazard H	一般危害事件发生的次数 Number of occurrences of general hazard events h_1	对局部环境或设施造成一定程度破坏或影响事件的发生次数，存在1次计1次 Number of occurrences that cause certain damage or impact to the local environment or facilities, record one location per presence	0	1,2	3,4	5,6	> 6	定量 Quantitative
		严重危害事件发生的次数 Number of occurrences of serious hazard events h_2	未编报或未落实国家相关规定而造成重大损失或潜在重大损失事件的发生次数，存在1次计1次 Number of incidents involving unreported status or failure to implement national regulations resulting in major loss or potential major loss, record one location per presence	0	/	/	/	≥ 1	定量 Quantitative

注：/表示该栏不包含此项，本研究指严重危害事件发生的次数指标共分2级：严重危害事件不发生时，评价等级为优；严重危害事件发生，评价等级为极差。Notes: / indicates that the item is not applicable. This article defines the number of occurrences of serious hazard events (h_2) as a two-level indicator: if no serious incident occurs, the evaluation grade is Excellent; if a serious incident occurs, the evaluation grade is Very poor.

$$V = Z^T R。 \quad (9)$$

式中：V 为综合评价矩阵；T 为标准化综合影响矩阵；R 为评价矩阵，$R = 「r_{ij}」_{n\times m}$，r_{ij} 为第 i 个指标对第 j 个评级的隶属度；量纲均为 1。按照最大隶属度的原则即可得到生产建设项目的水土保持效果。

2 结果与分析

2.1 指标权重计算

首先，邀请 9 位具有副高级及以上职称的水土保持领域专家组成专家组，通过标准化调查问卷收集其对各项指标的关联性评估。为确保数据质量，所有专家均具有 10 年以上从业经验，且近 5 年主持过省级以上相关科研项目。整理调查问卷得到直接影响矩阵 A，计算出综合影响矩阵 Q，并计算出二级指标中心度与原因度。根据计算数据绘制的因果关系图(图 1)直观呈现各指标间的相互影响，可清晰看出其在评估体系中的作用和重要性。中心度反映指标在评估体系中的重要性，高中心度要素对整体结果影响显著；原因度则区分指标的因果属性，正值表明其驱动其他指标变化，负值说明其易受其他因素影响。

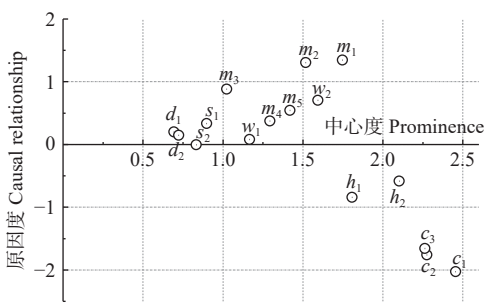


图 1 水土保持评价体系指标间的因果关系

Fig. 1 Causal relationship among indexes of soil and water conservation evaluation system

通过该图可以看出，流失强度等级 c_3、土壤流失控制比 c_2、水土流失治理度 c_1 有着较高的中心度，分别为 2.262 0、2.275 6 和 2.455 1，但其原因度较低，分别为−1.657 4、−1.759 0 和−2.028 8。即水土流失控制在系统中具有重要地位，其状态直接影响整体评价结果。但该因素更多是“结果”而非“原因”，其变化主要受其他因素的驱动。在生产建设项目水土保持项目的管理或优化系统中，该因素是需要重点关注的对象，但其改善需要从其他原因类因素入手。水土保持措施类 $m_1 \sim m_5$、弃渣堆置保护类 $w_{1\sim2}$ 中心度、原因度均较高，属关键原因类指标，为推动其他因素变化的核心驱动力，在制定水土保持方案时，该因素应优先被考虑。扰动范围控制 $d_{1\sim2}$、表土剥离保护 $s_{1\sim2}$ 因素在整个评价体系中的影响力较弱，但仍有一定的正向影响。

2.2 指标间相互影响作用

基于上述识别的高中心度因子，进一步通过综合影响矩阵计算得到生产建设项目水土保持效果评价体系的 ANP 网络结构(图 2)，以揭示各因素在系统中的治理优先级。其中，双向短划线箭头表征一级指标间的双向反馈机制；单向箭头反映指标间的因果传导路径，即尾部一级指标对头部一级指标产生影响；环向箭头表示一级指标内部的二级指标间相互影响。然后运用 YAANP 专业分析软件，构建包含反馈机制的超矩阵模型，得到具有收敛特性的稳态权重向量，并根据式 5 进行二次计算，最终确定各二级指标的混合权重值(表 3)。

ANP 超矩阵的权重排序结果显示，严重危害事件发生的次数 h_2、乱倒乱弃或顺坡溜渣的数量 w_2、扩大扰动面积的数量 d_2 及临时措施落实不及时、不到位的数量 m_3 指标的 ANP 权重、混合权重排名和一致性均较高，具有较高的可靠性和稳定性，应优先作为决策的治理靶点和核心依据。然而单一指标可能掩盖其改进潜力差异，如工程措施、临时措施落实不及时、不到位的数量 m_1、m_3 在 ANP 权重中较低，仅有 0.064 3 和 0.062 4，但其在混合权重中有所提升，二者排名分别由 6、7 上升至 2、5，表明其重要性可能被 ANP 低估[20]。这主要是因为 ANP 侧重于因素间的相互依赖关系，而混合权重可能更注重数据的客观性，导致权重差异，弥补了 ANP 方法在决策场景中主观性较强的局限性。而在实际应用中，需进一步分析工程措施、临时措施落实数量的重要性，避免被低估。

2.3 水土保持效果评价体系模型

尽管 ANP 权重显示严重危害事件发生的次数、乱倒乱弃或顺坡溜渣的数量等占主导因素，但要素间的网络化交互可能重塑其实际影响。为解构此复杂关联，本研究基于 ISM 模型构建了多级阶梯模型以揭示因素间的因果反馈路径(图 3)。位于层级结构顶层的因素为水土流失治理度、土壤流失控制比、流失强度等级，与前面“2.1”中结果一致。这是由于国家和地方对生产建设项目对水土流失治理有着严格要求，且土壤流失控制比是衡量项目区土壤流失程度的重要指标，直接影响项目的生态稳定性，而流失强度等级则直接反应项目区水土流

失的严重程度，是预警和决策的重要依据。

扰动控制范围是连接顶层与底层的过渡因素，即通过合理规划和管理便可有效控制扰动范围，减少水土流失。水土流失危害是顶层因素的结果体现，危害的严重程度可直接反馈到顶层因素，反映水土流失对项目区生态系统的负面影响。而渣土

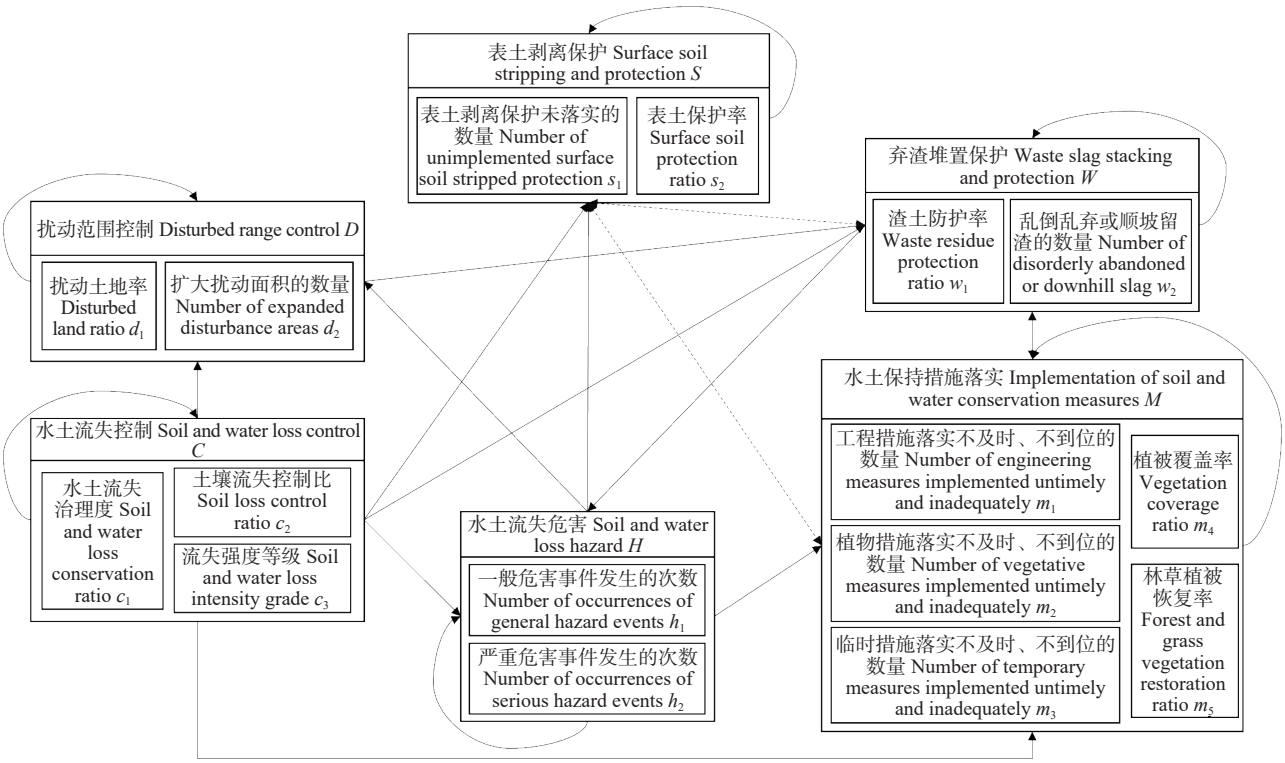


图 2　水土保持效果评价体系的 ANP 网络结构

Fig. 2　ANP network structure of soil and water conservation effect evaluation system

表 3　水土保持效果评价指标权重与混合权重

Tab. 3　Weights and mixed weights of evaluation indicators for soil and water conservation effect

一级指标 Primary indicator	权重 Weight	二级指标 Secondary indicator	ANP权重 ANP weight	排序 Order	混合权重 Mixed weight	排序 Order
D	0.395 8	d_1	0.035 7	9	0.036 5	9
		d_2	0.118 6	4	0.122 5	6
S	0.084 2	s_1	0.024 1	13	0.024 6	13
		s_2	0.008 9	15	0.009 0	15
W	0.265 0	w_1	0.029 6	12	0.029 8	12
		w_2	0.140 6	2	0.144 1	3
C	0.080 5	c_1	0.008 5	16	0.008 7	16
		c_2	0.058 1	8	0.059 6	8
		c_3	0.033 3	11	0.034 1	11
M	0.575 3	m_1	0.064 3	6	0.163 6	2
		m_2	0.062 4	7	0.135 5	5
		m_3	0.123 0	3	0.140 9	4
		m_4	0.017 8	14	0.018 3	14
		m_5	0.033 8	10	0.034 7	10
H	0.203 4	h_1	0.073 1	5	0.074 8	7
		h_2	0.168 3	1	0.173 5	1

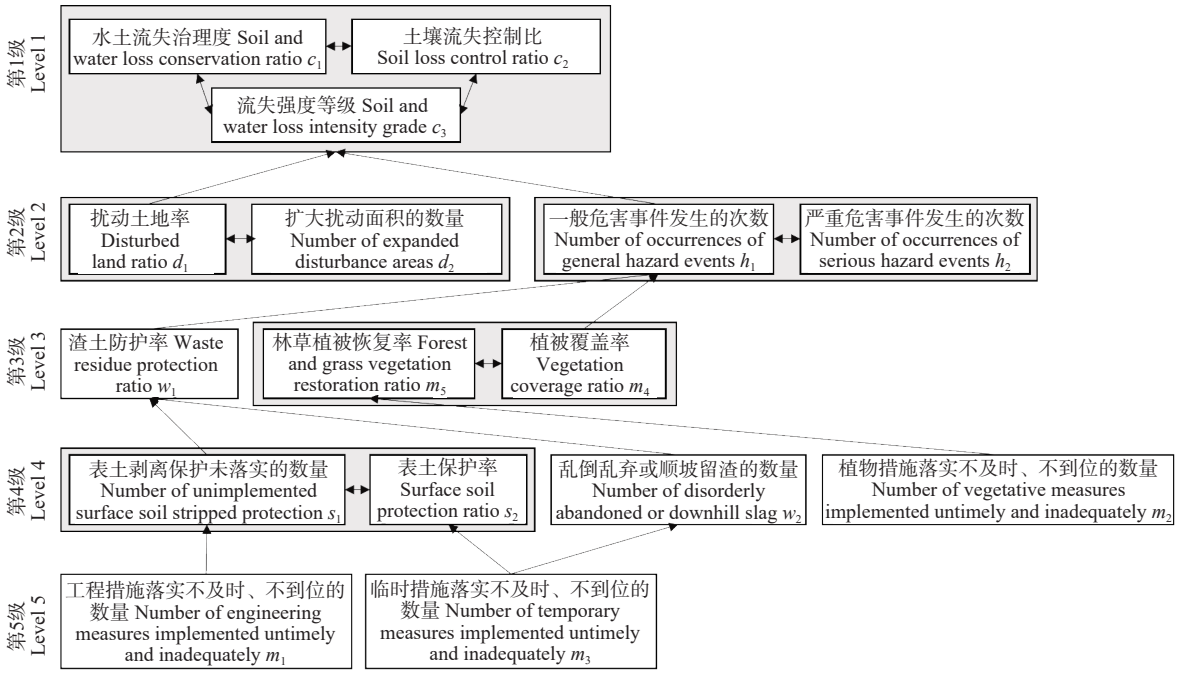


图 3 结果导向的水土保持效果多级阶梯模型

Fig. 3 Result-oriented multi-stage ladder model of soil and water conservation effect

防护率、植被覆盖率、林草植被覆盖率等指标可通过水土保持工程措施(如拦渣墙、排水沟)直接拦截弃渣、植被冠层物理削减雨滴动能等,实现防止松散土体进入径流的功能,可作为连接顶层因素与底层因素的重要指标。各比率的改善和提升既能显著减少项目区的土壤流失,又重度依赖于工程措施、管理手段,因而在系统中具有承上启下的功能。而表土剥离保护、弃渣堆置保护及水土保持措施(工程措施、生物措施、植物措施)落实因素位于第 4、第 5(最末)层,是由于该因素多为具体实施层面的措施,效果更多体现在局部区域,如表土剥离仅针对施工区表层、弃渣防护仅作用于渣场范围、植物措施仅限于复垦区域等,需逐步对上层因素进行驱动,故难以对系统整体产生全局性影响。

2.4 山东省湖东滞洪区建设工程水土保持效果评价

整理定量指标与定性指标数据,带入隶属度计算式 6 ~ 8,得到模糊评价矩阵 R,结合表 3 的 ANP 权重、DEMATEL-ANP 混合权重与水土保持效果综合等级评分向量,根据式 9 计算出山东省湖东滞洪区建设工程的水土保持效果评价结果,最后依据本研究构建的水土保持效果综合评价模型得到该项目的水土保持效果综合评价指数(表 4)。

由表 4 可知,施工第 2 年为该项目水土保持效果最差的年份,而后呈逐步改善为优良。这是由于项目第 2 年通常为施工的高峰期,土方开挖、填筑等作业频繁,且临时水土保持措施(如临时排水沟、覆盖防尘网)可能未能及时落实或覆盖不全面,永久性水土保持措施(如植被恢复、护坡工程)尚未完

表 4 山东省湖东滞洪区建设工程水土保持效果综合评价

Tab. 4 Comprehensive evaluation of soil and water conservation effect of Hudong flood detention area project in Shandong province

类别 Category	年份 Year			
	2019	2020	2021	2022
ANP权重 ANP weight	[0.765, 0.206, 0.029, 0, 0]	[0.612, 0.311, 0.047, 0.03, 0]	[0.862, 0.119, 0.019, 0, 0]	[0.726, 0.230, 0.044, 0, 0]
DEMATAL-ANP权重 DEMATAL-ANP weight	[0.719, 0.267, 0.014, 0, 0]	[0.544, 0.398, 0.058, 0.04, 0]	[0.796, 0.187, 0.017, 0, 0]	[0.682, 0.284, 0.034, 0, 0]
综合评价指数 Comprehensive evaluation index	0.749	0.576	0.823	0.712
评价等级 Evaluation level	良 Good	中 Moderate	优 Excellent	良 Good

全建成，地表扰动范围广，水土流失加剧现象严重[21]。以本研究为例，因撤退道路需完成的土地整治设计总量为 29.01 hm^2，2020 年、2021 年和 2022 年完成整治的面积分别为 0、1.61 和 24.15 hm^2；2020 年完成的水土保持植物措施仅有 1.78 hm^2 的植草护坡，2021 年第 2 季度始逐步在堤防工程、庄台及安全楼等分区栽植大叶黄杨球、海棠、白毛杨及撒播狗牙根等。此外，该项目 2019、2020 和 2021 年分别新增土壤流失量 50.19、536.25 和 90.17 t，2022 年度第 3、4 季度撤退道路防治区、庄台及安全楼防治区和堤防工程区的土壤流失量高达 431.91、10.71 和 8.96 t。建设工程完工前期新建水土保持措施落实及管护工作仍为水土保持的工作重点，尤其应加强已建水土保持措施的管护工作，确保其发挥正常的水土保持功能，植物措施成活率较低或覆盖率不高的区域也应及时补植补种。

3　讨论

刘帅华等[22]在参与各类生产建设项目水土保持三色评价工作后提出，新型生产建设项目水土保持综合评价中可依据生产建设项目规模大小不同、实际建设过程中面积变化不同，添加新增水土流失量的变化情况、实际表土剥离量、扩大扰动面积等指标，以便客观有效的体现出项目建设的实际情况。本研究构建了包含扰动土地率、表土防护率、渣土防护率等多个因子在内的指标体系，采用 DEMATEL-ANP 方法对生产建设项目的水土保持效果进行了综合评估。通过 DEMATEL 方法，分析了扰动土地率、植被覆盖率、拦渣率等关键指标之间的因果关系，识别出工程、植物措施落实不及时、不到位的数量（中心度：1.747、1.518）和乱倒乱弃或顺坡溜渣数量（中心度：1.594）为主要驱动因素。而结合 ANP 方法进一步构建的网络结构模型也显示上述 3 个因子的权重排名较为靠前，即该因子会扩大扰动面积，增加土壤侵蚀风险，同时对植被恢复和拦渣效果产生负面影响[23]。这些因素的高中心度和高权重表明，该因子在水土保持系统中处于核心地位，对其他因素具有强烈的驱动作用，为水土保持结果优良与否的主要驱动因素。这一结果与王海燕等[24]在水土保持核心驱动因素和评价重点方面具有较高的一致性，验证了本研究的可靠性。多级阶梯模型中原因导向的结果显示，工程措施、植物措施、临时措施的可达集包括表土保护率、渣土防护率、水土流失治理度、土壤流失控制比、流失强度等级、危害事件发生的次数等多个因子（图 4），即工程措施、临时措施与表土剥离保护、弃渣堆置保护存在较强的因果作用。这一结果与实地监测数据季报一致，表明水土保持措施在短期内对水土保持效果具有显著作用。

针对本研究提及的滞洪区类项目而言，其生产建设项目的水土流失多发生在裸露边坡、堆料场、弃渣场等区域，水土保持防治的重点为堤防、安全

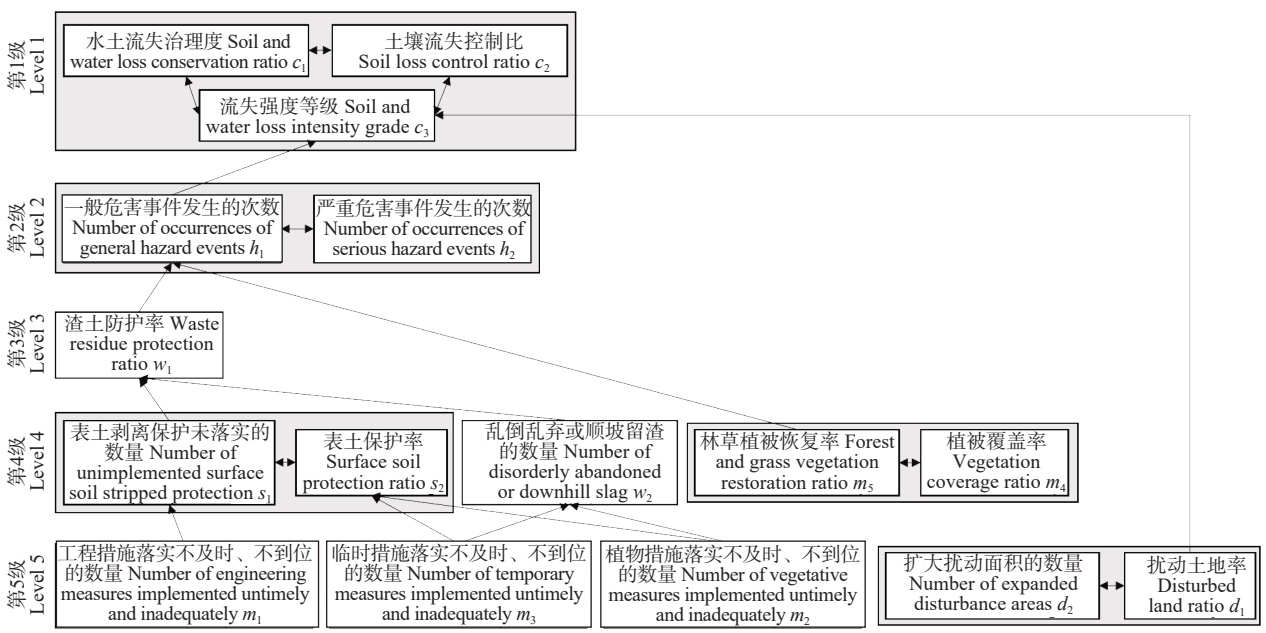


图 4　原因导向的水土保持效果多级阶梯模型

Fig. 4　Cause-oriented multi-level ladder model of soil and water conservation effect

区、安全台及其他建设过程中形成的裸露边坡和弃土弃渣[13]。这与本文得出渣土防护率为原因导向的水土保持效果多级阶梯模型结果一致。若不及时防护，产生的大量弃土弃渣会扩大泥沙流失来源，诱发行洪安全隐患。在蓄滞洪区蓄水条件下，水流流速和冲刷影响更大，水土流失更为严重。山东省湖东滞洪区建设过程中采取了土地整治、植树种草等各项水土保持临时措施、工程措施，有效的防止了工程建设引起的大量弃土弃渣流失；临时占地也在施工完成后采取了复耕或恢复为鱼塘和水塘，种植的草木已经起到了良好的水土保持作用，符合有关标准要求，能够起到良好的水土保持作用。

本研究中的水土保持效果评价体系构建数据来源主要依赖于专家访谈和问卷调查，评估结果存在主观性和不确定性，在多因素交互作用较强的情况下，现有方法也难以全面反映实际问题中的复杂性和不确定性。此外，由于水土保持效果评价涉及多个指标类型，模型的应用效果难以进行动态调整和机制优化，未来可引入频度分析法通过大数据筛选高频指标以构建初始指标体系，同时结合更多实际数据进行验证，构建科学、系统、全面的水土保持效果评价指标体系。且本研究仅针对山东省湖东滞洪区建设工程这一类型的生产建设项目做了计算过程繁琐的 DEMATEL-ANP 分析，未来可进一步推广至不同时空条件及项目类型，以验证模型的普适性，从而为建管单位优化环境保护与水土保持监理工作提供更广泛的理论支撑。

4 结论

应用 DEMATEL-ANP 法，建立 6 个准则层、16 个指标层的网络分析结构，构建了生产建设项目水土保持效果评价指标体系。评价决策的重要因素为严重危害事件发生的次数、乱倒乱弃或顺坡溜渣的数量扩大扰动面积的数量及临时措施落实不及时、不到位的数量。使用所构建的模型对山东省湖东滞洪区建设工程的水土保持效果进行综合评价的结果表示，山东省湖东滞洪区建设工程 2019—2022 年水土保持效果综合评价指数分别为 0.749、0.576、0.823 和 0.712，水土保持效果表现分别为良、中、优、良，总体表现良好。山东省湖东滞洪区工程建设过程中水土保持措施布设合理，水土保持效果整体优良。研究结果可为蓄滞洪区生产建设项目的水土保持效果评价和水土保持决策提供科学参考。

5 参考文献

[1] 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.
PAN Xi，LUO Wei，DUAN Xingwu，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.

[2] 吕文星，高亚军，徐十锋，等. 多沙粗沙区露天煤矿水土保持生态效应的监测评价 [J]. 水土保持通报，2019，39(3)：101.
LÜ Wenxing，GAO Yajun，XU Shifeng，et al. Monitoring and evaluation of ecological benefit of soil and water conservation at open-pit coal mine project in coarse sandy area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：101.

[3] 李向红，寸玉康，柳小强，等. 水电工程水土流失防治效果评价指标体系 [J]. 水土保持应用技术，2010(2)：15.
LI Xianghong，CUN Yukang，LIU Xiaoqiang，et al. Evaluation index system of soil and water loss control effect in hydropower project[J]. Technology of Soil and Water Conservation，2010(2)：15.

[4] 张志华，聂文婷，许文盛，等. 基于现场观测的深圳市典型生产建设项目水土保持措施效果分析 [J]. 中国水土保持，2021(10)：45.
ZHANG Zhihua，NIE Wenting，XU Wensheng，et al. Effect of soil and water conservation measures for typical production and construction projects in Shenzhen based on field observation[J]. Soil and Water Conservation in China，2021(10)：45.

[5] 闫超，张娜娜，赵言文. 江苏省输变电类生产建设项目水土保持综合评价 [J]. 水土保持通报，2014，34(2)：120.
YAN Chao，ZHANG Nana，ZHAO Yanwen. Comprehensive evaluation of soil and water conservation in power transmission engineering projects of Jiangsu province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2014，34(2)：120.

[6] CANTO-PERELLO J，BENITEZ-NAVIO A，MARTIN-UTRILLAS M，et al. Water resources sustainability model for wetland conservation based on anonymous expert elicitation[J]. Environmental Modelling & Software，2021，136：104952.

[7] SAATY T L，VARGAS L G. Decision making with the analytic network process[M]. New York：Springer，2006：75.

[8] CHUKWUMA E C，OKONKWO C C，AFOLABI O O D，et al. Groundwater vulnerability to pollution assessment：An application of geospatial techniques and integrated IRN-DEMATEL-ANP decision model[J]. Environmental Science and Pollution Research，2023，30(17)：49856.

[9] 孙永河，黄子航，李阳. DEMATEL 复杂因素分析算

法最新进展综述 [J]. 计算机科学与探索，2022，16(3)：541.
SUN Yonghe，HUANG Zihang，LI Yang. Review of state of the art on DEMATEL algorithms for complex factor analysis[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology，2022，16(3)：541.

[10] 高博文，刘其鑫. 基于网络分析法的水库供水工程项目风险评价研究 [C]//中国水利学会 2015 学术年会论文集(上册). 南京：中国水利学会，2015：400.
GAO Bowen，LIU Qixin. Research on risk assessment of reservoir water supply project based on network analysis method[C]//Proceedings of the 2015 annual symposium of China water conservancy society (Volume I). Nanjing：China Water Conservancy Association，2015：400.

[11] 袁剑波，崔钢，符秋生，等. 基于网络分析法的公路桥梁施工安全风险评价研究 [J]. 科技进步与对策，2014，31(11)：96.
YUAN Jianbo，CUI Gang，FU Qiusheng，et al. Research on safety risk assessment of highway bridge construction based on network analysis method[J]. Science & Technology Progress and Policy，2014，31(11)：96.

[12] 吕淑然，田琦. 基于 DEMATEL-ANP-GRA 的大型泵站运行安全综合评价 [J]. 安全与环境学报，2022，22(4)：1729.
LÜ Shuran，TIAN Qi. Comprehensive evaluation of operation safety of large pumping station based on DEMATEL-ANP-GRA[J]. Journal of Safety and Environment，2022，22(4)：1729.

[13] 高强，邹翔，赵健. 长江流域蓄滞洪区水土保持措施研究 [J]. 长江科学院院报，2008，25(3)：90.
GAO Qiang，ZOU Xiang，ZHAO Jian. Research on soil and water conservation plan of flood detention in Yangtze River basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2008，25(3)：90.

[14] DONG Hua，YANG Kun. Application of the entropy-DEMATEL-VIKOR multicriteria decision-making method in public charging infrastructure[J]. PLoS One，2021，16(10)：e0258209.

[15] 蔡启涛，李和林，李果，等. 基于 DEMATEL-ANP 的平面闸门健康评估 [J]. 水电能源科学，2025，43(2)：159.
CAI Qitao，LI Helin，LI Guo，et al. Health assessment of plain gate based on DEMATEL-ANP method[J]. Water Resources and Power，2025，43(2)：159.

[16] ZARE S，SHIRVAN H E，HEMMATJO R，et al. Using the Analytic Network Process method for prioritizing and weighing shift work disorders among the personnel of hospitals of Kerman University of Medical Sciences[J]. Journal of Circadian Rhythms，2018，16：10.

[17] CHEN Yong，JIN Qiuxia，FANG Hui，et al. Analytic network process：Academic insights and perspectives analysis[J]. Journal of Cleaner Production，2019，235：1276.

[18] 台辉，王苹，江宁，等. 基于 AHP-模糊综合评价法的生产建设项目水土保持效果研究 [J]. 水土保持通报，2023，43(5)：169.
TAI Hui，WANG Ping，JIANG Ning，et al. Research of soil and water conservation effects of production and construction projects based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2023，43(5)：169.

[19] 杜晓东，曾四鸣，刘科研，等. 基于云模型的配电网运行画像数字孪生构建方法 [J]. 电力系统保护与控制，2022，50(10)：104.
DU Xiaodong，ZENG Siming，LIU Keyan，et al. Construction of portraits for a distribution network with digital twins based on a cloud model[J]. Power System Protection and Control，2022，50(10)：104.

[20] CHEN Zhihua，MING Xinguo，ZHANG Xianyu，et al. A rough-fuzzy DEMATEL-ANP method for evaluating sustainable value requirement of product service system[J]. Journal of Cleaner Production，2019，228：485.

[21] 李怡凤，王继军，连坡，等. “进则全胜”下的水土保持评价指标体系构建 [J]. 水土保持研究，2021，28(2)：390.
LI Yifeng，WANG Jijun，LIAN Po，et al. Construction of evaluation index system of soil and water conservation under the condition of ‘progress towards victory’[J]. Research of Soil and Water Conservation，2021，28(2)：390.

[22] 刘帅华，袁涛. 生产建设项目水土保持监测三色评价的思考与探讨 [J]. 水电站机电技术，2021，44(8)：81.
LIU Shuaihua，YUAN Tao. Consideration and discussion on three color evaluation of soil and water conservation monitoring in production and construction projects[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station，2021，44(8)：81.

[23] 曾欢欢. 水土保持方案设计要点及效果评价研究 [J]. 中国新技术新产品，2024(13)：127.
ZENG Huanhuan. Study on design points and effect evaluation of soil and water conservation scheme[J]. New Technology & New Products of China，2024(13)：127.

[24] 王海燕，丛佩娟，袁普金，等. 国家水土保持重点工程效益综合评价模型研究 [J]. 水土保持通报，2021，41(6)：119.
WANG Haiyan，CONG Peijuan，YUAN Pujin，et al. Comprehensive evaluation model of national key project benefits of soil and water conservation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(6)：119.