基于熵权-模糊综合评价的城市生产建设项目水土保持效果评价

钱振宇[1], 张青峰[1], 霍春平[2], 牛银环[2], 焦昱华[1]
(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西安市水利水土保持工作总站, 陕西 西安 710018)

摘　要: [目的]构建面向合规城市项目的量化评价方法,为不同类型项目形成的差异化提质路径提供量化依据,推动城市水土保持由合规管理向绩效管理转型。[方法]依据《城市生产建设项目水土保持技术规范》与《生产建设项目水土流失防治标准》,结合海绵城市雨洪管理要求,构建包含"治理程度、土壤保持、植被措施、径流保持"4个准则层共11项指标的评价体系。采用熵权法(EWM)确定客观权重,并运用模糊综合评价法(FCE)处理评价等级边界的模糊性,建立EWM-FCE耦合评价模型。以西安市2024年完成自主验收报备的34个典型竣工项目(市政工程、房地产开发、公共服务设施)为样本,进行实证评价与差异分析。[结果]①模型能够在遵守现行合规标准的前提下区分项目绩效差异,3类项目均值呈"房地产开发类得分较高(72.54),市政工程居中,公共服务设施偏低(58.38)"的梯度格局。②径流保持类指标对综合绩效贡献突出,其中场地综合径流系数为关键约束因子,并与雨水径流控制率和透水铺装面积比例为影响项目得分上限的"雨洪调控链"的核心权重指标。③房地产项目在施工期控蚀与防护(土壤流失控制比-土石方综合利用率,尤其是渣土防护率)方面更易形成优势;市政项目的提升空间主要集中在增强场地综合径流系数-透水铺装面积比例的连续性;公共服务设施在海绵融合指标上更易出现短板叠加。[结论]提出的EWM-FCE模型可分析出项目综合得分、绩效等级及短板指标,实现对合规项目进行"优劣区分"和"分级评价"。该方法可用于建设单位项目自评诊断与监管精准核查。

关键词: 水土保持; 城市生产建设项目; 熵权法; 模糊综合评价; 径流调控
文献标识码: B　　**文章编号:** 1000-288X(2026)04-0218-10　　**中图分类号:** S157

文献参数: 钱振宇, 张青峰, 霍春平, 等.基于熵权-模糊综合评价的城市生产建设项目水土保持效果评价[J].水土保持通报,2026,46(4):218-227. Qian Zhenyu, Zhang Qingfeng, Huo Chunping, et al. Evaluation of soil and water conservation effects of urban production and construction projects based on entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):218-227.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.006　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.006**

Evaluation of soil and water conservation effects of urban production and construction projects based on entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation

Qian Zhenyu[1], Zhang Qingfeng[1], Huo Chunping[2], Niu Yinhuan[2], Jiao Yuhua[1]
(1.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Xi'an Water Conservancy and Soil Conservation General Station, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*)

Abstract: [Objective] A quantitative evaluation method for compliance-oriented urban projects was developed, in order to provide a quantitative basis for the differentiated improvement paths formed by different types of projects, and promote the transformation of urban water and soil conservation from compliance management to performance management. [Methods] Based on the *Technical Code for Soil and Water Conservation of Urban Production and Construction Projects* and the *Standards of Soil Erosion Control for Production and Construction Projects*, and combined with the requirements of sponge city stormwater management, an evaluation system was developed,

收稿日期:2025-11-09　　**修回日期:**2026-01-19　　**采用日期:**2026-01-21
资助项目:陕西省农业关键核心技术攻关项目"双碳微生物高值化利用与耕地质量提升技术集成应用"(2025NYGG011)
第一作者:钱振宇(2001—),男(汉族),陕西省安康市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与碳汇核算。Email:ZhenyuQinn@nwafu.edu.cn。
通信作者:张青峰(1974—),男(汉族),山西省孝义市人,博士,教授,主要从事土地资源与空间信息技术研究。Email:zhqf@nwsuaf.edu.cn。

which included 11 indicators under four criterion layers of governance implementation, soil conservation, vegetation measures, and runoff regulation. Objective weights were derived using the entropy weight method (EWM), and a fuzzy comprehensive evaluation (FCE) method was employed to address the inherent ambiguity between performance evaluation grades, so as to establish an EWM-FCE coupled evaluation model. Using 34 typical completed projects of Xi'an (covering municipal projects, real estate development, and public service facilities) that completed independent acceptance and filing in 2024 as case studies, an empirical evaluation and difference analysis were conducted. [Results] The model could distinguish differences in project performance while complying with existing regulatory standards. The mean scores of three types of projects showed a gradient pattern: real estate development had a relatively high mean score (72.54), municipal projects had an intermediate mean score, and public service facilities scored relatively low (58.38). The weight results showed that runoff regulation indicators contributed significantly to the comprehensive performance, among which the composite site runoff coefficient was a key constraint factor, and together with the runoff control rate and permeable pavement ratio, formed the core weight indicators of the "stormwater regulation chain" that largely determined the upper limit of project scores. Comparison among project types indicated that real estate projects tended to perform better in construction-phase erosion control and protection (especially spoil/stockpile protection), that the municipal projects exhibited greater improvement potential in strengthening the continuity of runoff regulation chain, and that public service facilities were more likely to underperform in sponge city integration indicators. [Conclusion] The proposed EWM-FCE model can be used to analyze the comprehensive scores, performance grades, and weak indicators of projects, thereby realizing the differentiation of strengths and weaknesses and graded evaluation of compliance projects. This method can be used for project self-evaluation by construction units and for targeted supervision and inspection. It also provides a quantitative basis for formulating differentiated quality upgrading pathways for different types of projects, facilitating a transition of urban soil and water conservation from compliance-based management to performance-based governance.

Keywords: soil and water conservation; urban production and construction projects; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation; runoff regulation

水土保持工作是生态文明建设的重要支撑[1]。随着中国城市建设与高质量发展要求持续推动[2-3],城市生产建设项目的水土保持工作正从"防治水土流失"逐步向"提升生态服务功能"和"协同雨洪管理"的综合治理阶段迈进[4-6]。现阶段中国城市生产建设项目水土保持评价工程验收主要依据相关规程与标准开展,核心是对项目水保效果进行最低阈值核查。这类合规性评价在约束建设过程,守住生态底线方面具有重要作用,同时也存在一些不足:①结果分辨率不高。验收结论通常以"通过/不通过"为主,同为合格的项目难以进一步区分治理质量的差异,缺少针对"高标准治理"的量化依据。②不能区别项目类型间的差异。市政工程、房地产开发与公共服务设施在空间形态、用地结构与功能约束上存在显著差异,单一达标判定很难揭示其薄弱环节与提升路径。③赋权与等级边界的科学性不强。部分综合评价依赖专家经验赋权,且"优、良、中"等级之间存在天然模糊区间,若缺乏统一的边界处理机制,评价结果的稳定性与可解释性容易受到影响。

模糊综合评价法(FCE)基于隶属度理论,能够将"优、良、中"等边界不清的定性评价转化为定量评分,在处理多因素、非线性的复杂系统评价中优势显著。目前,该方法已在流域生态安全、水资源承载力及基础设施可持续性等宏观领域取得了实质性进展[7-11],并逐步向水土保持效果评价领域拓展[12-15],有效解决了单指标评价信息失真与主观判断随意性大的难题。然而,将该评价体系应用于"城市生产建设项目"这一微观尺度时,现有的研究成果仍存在明显的滞后性。①评价维度缺失。现有研究多沿用传统的土壤侵蚀控制指标(如扰动面积、流失量),缺乏对"海绵城市"背景下雨洪调控功能的量化考量,导致评价结果难以反映项目对城市水文过程的真实影响;③赋权机制的适配性不足。传统评价多依赖专家经验赋权(AHP),忽略了不同类型项目(如线性的市政道路与点状的房地产开发)在数据特征上的客观差异,难以保证评价结果的公允性。而熵权法(EWM)可依据样本数据离散程度确定客观权重,降低人为赋权的随意性。将二者耦合,有望在保证合规底线一致的同时,进一步实现对合规项目的绩效分级与短板识别。

本研究以西安市2024年已完成自主验收报备的34个典型竣工项目为样本，在传统水土保持指标体系中引入雨洪调控相关指标，对“海绵城市”背景下径流过程调节能力进行量化；同时，构建EWM-FCE评价模型，实现项目综合得分、等级划分与关键指标诊断，并进一步从项目类型出发，解释差异机制，为城市水土保持从“固定合规”走向“主动提质”提供可操作的量化依据。

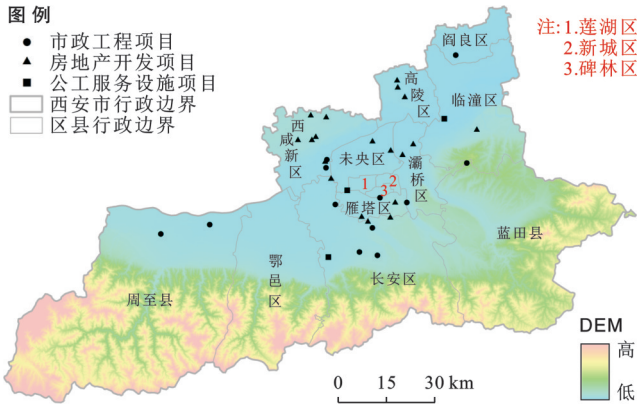
1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

西安市地处陕西省关中平原中部，辖11个区，2个县及多个国家级和省级重点开发区。地貌类型有山地、沿山洪积扇、低山丘陵、黄土台塬及平原。地质与地形条件复杂，水土流失类型多样。

1.2 数据来源与质量控制

选取2024年西安市完成水土保持设施自主验收报备的34个典型生产建设项目为研究对象（市政工程13个、房地产开发18个、公共服务设施3个）。样本选取遵循“类型覆盖全面，空间分布均衡”的原则（图1，表1），覆盖建设活动集中区域并兼顾主要地貌单元，样本具有代表性。



注：西安市行政区边界从（资源环境科学与数据平台 https://www.resdc.cn/）下载，DEM数据从（地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/）下载。

图1 城市生产建设项目区位分布图

Fig.1 Location distribution map of urban production and construction projects

指标数据主要来自各项目的《水土保持设施验收报告》和《水土保持监测总结报告》。为保证数据的可比性与可靠性，在使用前进行口径核对与质量控制：①确保所有项目均已完成行政核查与备案，具备合规性基础；②优先采用经第三方监测机构过程监测并在竣工验收阶段经专家复核的指标数据，减少统计口径不一致带来的偏差。

2 研究方法

2.1 评价指标体系的确定

指标体系构建过程遵循全面、公正、科学等原则[16]。城市生产建设项目不仅造成地表扰动与土壤流失，还显著改变了地表下垫面性质，从而引起径流系数增大、汇流时间缩短等水文效应。

基于此，本研究主要依据《城市生产建设项目水土保持技术规范》（DB6101/T 3094—2020）及《生产建设项目水土流失防治标准》（GB 50434—2018），选取反映水土流失治理程度、土壤保持及植被恢复状况的传统指标（C_1—C_8），并参考《海绵城市建设评价标准》（GB/T 51345—2018），引入径流保持类指标（C_9—C_{11}），形成“目标层—准则层—指标层”的三级指标体系（表1）。

在“样本均为合规竣工项目”的前提下，弃渣场安全属性以验收结论作为准入条件，不在本模型中重复计分。在指标层设置“渣土防护率（C_3）”，主要用于表征弃渣处置全过程中挡护、截排水、覆盖等防护措施的落实程度，以便将评价重点聚焦于弃渣防护效果，实现从“底线达标”到“绩效优劣”的延伸。

2.2 指标分类分级

为确保评价等级划分的科学性与适用性，本研究采取“国家标准为主，专家咨询修正为辅”的原则，制定分级标准（图2）。具体步骤如下：

（1）传统水土保持指标。依据《GB 50434—2018》确定阈值。对于“水土流失治理度（C_1）”“土壤流失控制比（C_2）”“林草覆盖率（C_6）”等6项传统指标，直接依据《生产建设项目水土流失防治标准》（GB 50434—2018）中对一级标准、二级标准及三级标准的防治目标要求，分别对应评价等级中的Ⅰ级（优）、Ⅱ级（良）与Ⅲ级（中）。在此基础上，参考相关文献对Ⅳ级（及格）与Ⅴ级（差）的阈值进行外推补充，使等级体系完整可用。

（2）径流调控等跨学科指标。依据国家标准给出初值，专家进行修正。对“场地综合径流系数（C_9）”“雨水径流控制率（C_{10}）”等缺乏直接水保国家标准对应的跨学科指标，本研究采取“标准初定—专家修正”的流程确定分级阈值。首先参考《海绵城市建设评价标准》（GB/T 51345—2018）及《室外排水设计标准》（GB 50014—2021）中的相关控制要求与推荐取值，设定基础分级标准，然后邀请5位水土保持与生态水利领域的高级工程师组成专家组，采用德尔菲法（Delphi method）进行多轮意见征询。专家组结合西安市的气候特征及本地工程实践经验，对初始分级阈值提出调整意见。

表 1　城市生产建设项目水土保持效果评价指标体系

Table 1　Evaluation indicator system for soil and water conservation effects of urban production and construction projects

目标层	准则层	指标层	指标释义
水土保持效果评价(A)	治理程度(B_1)	水土流失治理度(C_1)	依据GB 50434－2018,反映治理达标面积比例
		土壤流失控制比(C_2)	依据GB 50434－2018,反映容许流失量与实际流失量的比值
	土壤保持(B_2)	渣土防护率(C_3)	项目防治责任范围内采取措施实际挡护的永久弃渣和临时堆土数量占总量的百分比(依据GB 50434—2018修正)
		表土保护率(C_4)	依据GB 50434－2018,反映表土资源剥离与保护利用情况
		土石方综合利用率(C_5)	反映开挖土石方的资源化利用程度,减少弃渣排放
	植被措施(B_3)	林草覆盖率(C_6)	依据GB 50434－2018,反映林草植被恢复面积比例
		下凹式绿地率(C_7)	具有调蓄雨水功能的下凹式绿地面积占绿地总面积的比例(参考海绵城市技术导则)
		林草植被恢复率(C_8)	依据GB 50434－2018,反映可恢复林草植被面积的实际恢复程度
	径流保持($B_4$①)	场地综合径流系数(C_9)	跨学科指标。反映场地硬化后雨水产流强度的综合参数,依据GB 50014《室外排水设计标准》加权计算
		雨水径流控制率(C_{10})	跨学科指标。指在设计降雨条件下,场地内通过渗、滞、蓄措施控制的径流体积占总产流体积的比例(参考GB/T 51345)
		透水铺装面积比例(C_{11})	跨学科指标。采用透水材料铺设的硬化地面面积占室外硬化地面总面积的比例

注:①为响应城市水土保持与海绵城市建设协同发展的需求,在传统国标指标(C_1—C_6,C_8)基础上,增设了径流保持类指标(C_9—C_{11})及下凹式绿地率(C_7),旨在量化评价建设项目对地表径流的调控与削峰效益。

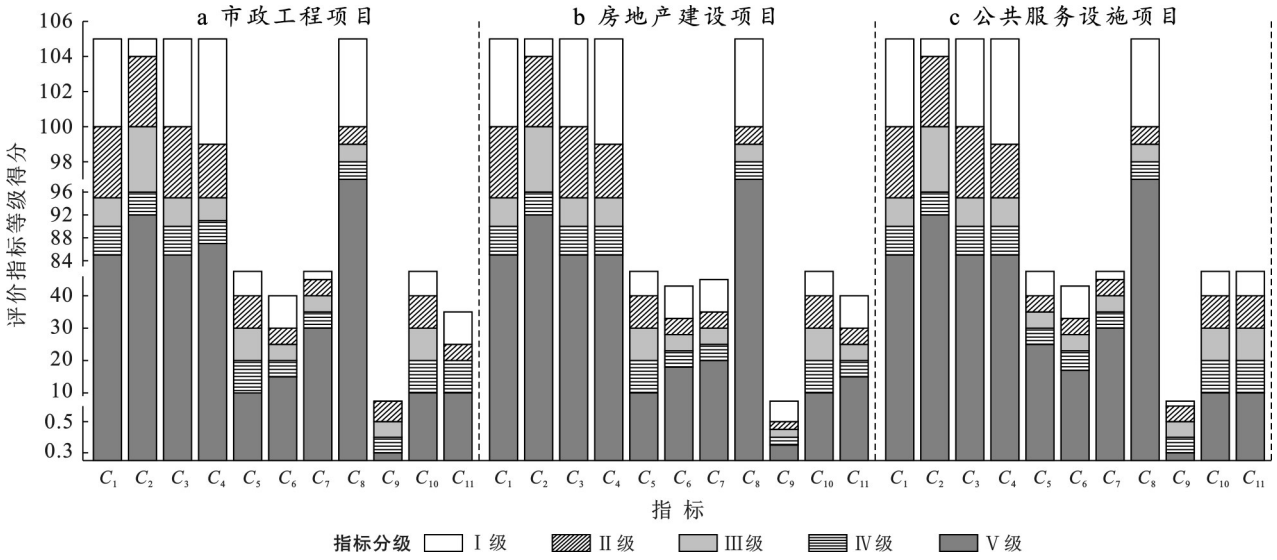


图 2　各类型项目评价指标分级图

Fig.2　Grading chart of evaluation indicators for various project types

2.3　熵权法-模糊综合评价模型(EWM-FCE)

熵权法(entropy weight method, EWM)是一种基于信息论的客观赋权方法。其核心思想是利用"信息熵"度量指标数据的离散程度[17],若某项指标在各评价对象间的数值差异(变异度)越大,其信息熵越小,表明该指标提供的有效信息量越多,在综合评价中起到的作用就越大,权重也越高[18]。这一特性使得EWM能有效避免专家打分中人为因素带来的主观随意性,适用于揭示不同项目在同一指标上的客观绩效差异。

本研究采用的模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)是建立在模糊数学基础上的系统评价方法。在城市生产建设项目的水土保持效果等级(如"优"与"良")之间往往不存在绝

对清晰的物理界限，项目可能处于“介于两级之间”的状态。FCE通过构建隶属度函数，将这种“边界不清”的等级关系转化为可计算的隶属度，并据此对多指标共同作用下的总体水平进行综合判定，从而避免单纯“达标/不达标”带来的信息损失。

本研究采用EWM-FCE耦合模型，旨在发挥二者的互补优势。首先根据实测数据，利用EWM确定客观权重，识别各指标对系统差异的贡献度；随后通过FCE计算各项目对不同评价等级的隶属度，得出量化的综合评价结果。

2.4 指标权重结构特征

为识别不同项目类型在权重分布上的结构特征与均衡水平，引入有效指标指数（effective number of indicators，ENI）与赫芬达尔指数（Herfindahl-Hirschman index，HHI）。前者强调权重的分散性，后者揭示权重的集中性，二者结合可用于判断某类项目是否由少数关键指标驱动，从而为监管重点与提质方向提供量化依据。

（1）有效指标指数（ENI）。ENI表征体系中“有效参与”的指标数量，用于衡量评价体系中各指标权重分布的均衡性与有效参与程度，反映系统信息贡献的集中或分散程度[19]。

$$\mathrm{ENI}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}w_i^2} \tag{1}$$

式中：w_i为第i个指标的标准化权重；n为指标总数。ENI值越大，说明权重越分散，结构越均衡，体系的“参与度”越高；反之则表明某些指标具有显著的支配地位。

（2）赫芬达尔指数（HHI）。HHI是衡量集中度的经典指标，用于衡量系统中指标权重或要素分布的集中程度，它反映体系结构的“主导性”与“均衡性”特征，是一种定量描述“集中-分散”格局的指标[20]。

$$\mathrm{HHI}=\sum_{i=1}^{n}w_i^2 \tag{2}$$

HHI越接近1，说明体系越集中，单一指标支配性强；越接近$1/n$，则权重越分散。

ENI与HHI互为倒数，可共同描述体系的“复杂度-集中度”状态。若某一类型项目HHI显著高于其他类型，说明该类项目的评价结果更可能由少数高权重指标驱动。该类项目在管理上可优先关注并稳定这些关键指标，避免因核心指标波动导致综合得分大幅变化。通过对ENI/HHI的动态跟踪，有助于识别不同项目类型权重结构的收敛或分化趋势，为后续权重解释、指标优化与监管重点设置提供量化支撑。

3 结果与分析

3.1 指标权重的特征

权重结果体现了不同类型项目的“关键环节驱动”差异（图3）。

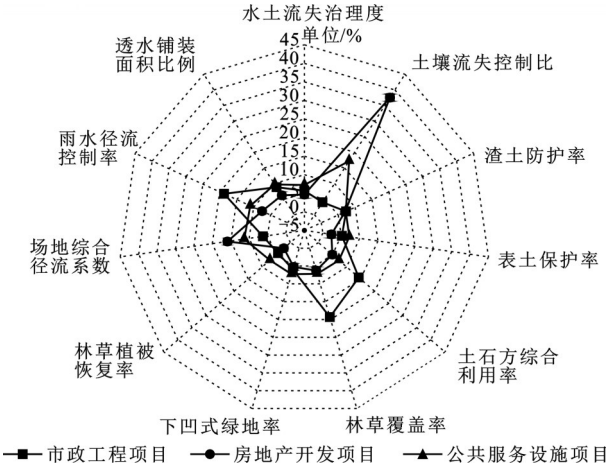


图3 指标权重导向图

Fig.3 Indicator weight orientation diagram

（1）房地产开发类项目呈现明显的“双核心”特征。土壤流失控制比（C_2）与场地综合径流系数（C_9）的权重显著高于其他指标。这表明该类项目的综合评价更依赖于施工期对扰动与侵蚀的控制（控蚀）和建成后对地表径流的调控（削峰）。这两个环节是拉开得分差距的关键。

（2）市政工程类项目的权重分布集中于“植被-滞蓄”的相关指标。雨水径流控制率（C_{10}）与林草覆盖率（C_6）的权重较为突出（表2）。这一格局与线性工程空间狭长、沿线多依赖分散式绿化带与渗滞设施发挥作用的特征相一致，说明其绩效提升更可能来自对径流调控与绿化措施的协同优化所形成的有效调控链条。

（3）公共服务设施类项目权重更均衡，未出现单一指标显著领先的现象。这表明该类项目通常需要在治理、修复与雨洪管理等多个环节进行优化（表2）。

“径流调控链”是指基于海绵城市理念，将分散的工程措施串联形成的“源头减排—过程控制—末端调控”连续系统[21]，其效益高度依赖设备之间的水力连通性，即下凹式绿地、植草沟及调蓄设施的水力连通，实现雨水径流的“渗、滞、蓄、净、用、排”全过程管理。现有研究表明，径流调控设施的连通性是决定系统效益的关键[22]。若调控链条中存在不透水阻

隔或管网高程衔接不当,整体协同效益会显著下降。因此,在生产建设项目水土保持效果评价与提质中,应把 C_9,C_{10},C_{11}(必要时联动 C_7)作为优先诊断的关键节点,围绕连通性与连续性提出针对性改进。

表 2　不同项目类型权重导向分析

Table 2　Weight orientation analysis of different types of projects

项目类型	市政工程项目	房地产开发项目	公共服务设施项目
权重格局	HHI=0.123, ENI=8.13 权重中度集中,存在关键指标主导	HHI=0.193, ENI=5.18 权重集中度较高,呈“双峰驱动”特征	HHI=0.101, ENI=9.90 权重较为均衡
分歧最大的指标	C_2(土壤流失控制比)权重显著高于部分生态、雨洪指标(如 C_6,C_{10},C_{11}),项目间差异主要由控蚀与雨洪要素拉开	控蚀链指标(如 C_2—C_5)整体权重高于部分雨洪要素;同时 C_9(场地综合径流系数)权重突出	指标间差异不明显,综合绩效更多体现为多要素协同达标
核心措施	以“径流调控+绿化恢复”为主。下凹式绿地(C_7)、透水铺装(C_{11})、雨水径流控制(C_{10})与沿线绿化(C_6)协同提升	优先强化控制控蚀:土方及表土闭环(C_4,C_5)、渣土防护(C_3)与施工期控蚀(C_2)优先;同步降低场地综合径流系数(C_9)	施工期截排水与弃土管理(C_3)+植被恢复(C_6,C_8)+雨洪设施(C_{10},C_{11})并重,形成稳定的径流调控链
后期收益	提升城市景观与生态服务,增强对强降雨事件的调蓄与削峰能力	降低侵蚀与泥沙外排风险,提升场地长期生态稳定性与运行质量	综合效益提升更均衡,整体水土保持绩效更稳定
启 示	监管与提质可优先关注主雨洪调控关键指标(C_9—C_{11})与植被恢复(C_6,C_7),以“海绵+水保”协同提升绩效	采取“防治结合”,先控蚀稳底,再分步进行生态修复与海绵完善	建议采用“多指标同步提升”策略,避免单项突进,形成治理-修复-雨洪协同的稳定格局

3.2　综合得分

由图 4 可知,3 类项目的模糊综合评价得分(均值与中位数)总体呈“房地产>市政>公服”的梯度格局。

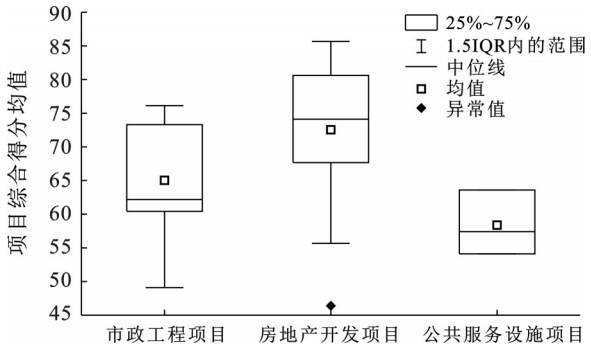


图 4　3类项目综合得分箱线图

Fig.4　Box plot of comprehensive scores of three types of projects

房地产开发项目得分整体处于较高水平,分布离散度较大,并表现出显著的高分长尾特征。高分项目往往在若干关键高权重指标上同时表现较好,尤其是土壤流失控制比(C_2)与场地综合径流系数(C_9),并与雨洪调控相关能力形成叠加效应。当这些关键指标同步达到较高水平时,综合得分会被显著拉升,从而形成高分集聚。

市政工程项目综合得分处于中等水平,分布较为收敛。该类项目对“径流调控链”具有高度敏感性,只要某个关键节点(指标)偏弱,整体得分就容易被“短板效应”所制约。由此可见,市政工程提升绩效的重点在于补齐径流调控链的薄弱节点并保证设施连通与连续,避免形成“断点”,影响整体效果。

公共服务设施项目合规性一般较好,但受制于用地紧凑、硬化率高及预算刚性等约束,雨洪调控与铺装优化类指标提升空间有限,常呈现“底线能达,提档困难”的特征。对该类项目更合理的策略是先确保核心阈值指标稳定达标,再通过多项小幅提升,避免“叠加失分”。

3 类项目具有明确的过程机理解释与指标映射关系(表 3)。研究结果表明,该评价体系中存在明显的“短板约束”与“叠加降级”现象。当少数高权重指标出现低值时,综合得分会被显著拉低;而当多项指标同时处于偏低水平时,项目更容易出现整体等级下滑[23]。

将土壤流失控制比(C_2)、场地综合径流系数(C_9)与雨水径流控制率(C_{10})(必要时可联动透水铺装面积比例 C_{11} 及下凹式绿地率 C_7)设为核心阈值指标,作为综合绩效的底线约束;其余指标作为协同改进项,用于提升系统稳定性与综合效益。通过引入“核心指标不达标即限制等级上限”的非补偿约束,可降低关键指标波动引发的综合等级“连锁下坠”风险。

3.3　典型项目分析

选取高分和低分项目进行案例分析(表 4)。高分项目用于总结可复制的提升做法与关键增益路径;低分项目用于识别导致得分偏低的主要短板及其叠加效应。

表3 不同项目评价得分差异及成因

Table 3 Score differences and causes of different types of projects

项目	市政工程项目	房地产开发项目	公共服务设施项目
总体特征	综合得分主要取决于径流调控链条的完整性，关键环节薄弱会制约整体水土保持成效。	C_2与C_9是影响综合得分的核心因素，施工期措施闭环程度决定整体成效的稳定性	各项指标整体协调性较好，综合得分差异主要来源于局部薄弱指标及其协同不足
高分共性	C_9，C_{10}，C_{11}协同达优，沿线绿化与恢复（C_6，C_8）稳定；调控设施水力衔接顺畅，形成连续调控链	C_2高，C_9低是高分关键；施工期表土保护（C_4）—渣土防护（C_3）—土石方利用（C_5）实现闭环，配合导流与分级调蓄，使径流控制（C_{10}）同步提升	C_2，C_9，C_{10}，C_{11}整体达良以上，短板少；植被覆盖与恢复（C_6，C_8）稳定，综合得分更稳定
失分机理	C_9偏高或C_7不足，导致调控链出现“断点”，即使单项措施较好，也难以提高综合得分	施工期闭环薄弱。C_4，C_3，C_8不到位导致裸地冲刷、淤堵外溢；即便控蚀单项突出，也会因过程失稳拖累综合得分	很少出现单项“极差”，但多项略低（C_7，C_{10}，C_{11}等）叠加，使等级停留或下滑
改进方法	优先补齐C_7，C_{10}，C_{11}，并做连通性校核（高程、溢流路径、入流出流），以压降C_9并消除链路断点	将C_3，C_4，C_5设为施工期刚性控制点，强化临时排水导流与过程防护；在此基础上持续优化雨洪设施衔接，稳定降低C_9，提升C_{10}，把“控蚀优势”转化为稳定高分	设置底线阈值（C_2，C_9，C_{10}，C_{11}先达标），再通过C_6，C_8与景观生态措施协同提升，避免“多项小缺口”累积失分

表4 不同类型典型项目分析

Table 4 Analysis of typical projects of different types

项目类型	市政工程项目	房地产开发项目	公共服务设施项目
高分项目（综合分）	#8，#11，#12	#31，#19，#27，#20，#26	
优势	“径流调控链”完整，雨洪指标协同表现良好。C_9（Ψ）偏低，C_{10}，C_{11}，C_7处于较高水平；同时施工期控蚀闭环到位（如C_4，C_3，C_5），并配合绿化恢复（C_6，C_8），使“措施、指标、得分”一致，综合得分稳定偏高	呈“C_2（控制比）+C_9（Ψ）”双核心驱动。施工期表土、渣土管理与土石方闭环（C_4，C_3，C_5）到位，叠加微地形导流与分级调蓄，使C_9降低，C_{10}提升；后期运维较好，效果保持更稳定	
低分项目（综合分）	#5，#9，#10	#25，#15，#16	整体偏低
原因	末端调蓄与入渗设施不足、透水铺装堵塞或失效、设施衔接差，导致C_9偏高且C_{10}，C_{11}，C_7偏低；关键雨洪指标短板对总分形成明显约束	透水结构薄且缺少反滤与渗排，绿地-调蓄设施未形成连通；施工期表土及渣土管理偏弱，造成过程控蚀与雨洪指标同时受损，使调控链相关指标出现低值并拖累综合得分	硬化区透水与入渗措施不足，排水口直排，缺少缓冲设施；同时多项指标（雨洪调控与生态恢复等）同步偏弱，出现“多项叠加降级”的系统性失分
整改措施	①扩容或新增末端调蓄与入渗设施；②用渗井、渗渠等将雨水口与下凹绿地、调蓄设施串联；③优化溢流口标高与溢流路径，避免过早外排；④清掏、修复透水铺装与下凹绿地，恢复入渗能力	①加厚透水结构（建议≥20～30cm）并配置反滤层+渗排系统；②普通绿地改造为下凹绿地与雨水花园；③形成“下凹-调蓄”连续链路并完善导流；④建立季度透水性巡检与雨后消退监测，固化运维责任	①硬化区增设透水带、植草沟等入渗措施，减少直排；②设置1～2处功能性下凹绿地并明确进出水路径；③扩容末端调蓄或增设渗排设施，提升雨洪调控能力

通过对比分析，进一步验证评价结果的解释性与方法的可推广性。典型高分项目的共性在于关键雨洪指标协同较好（C_9偏低；C_{10}，C_{11}，C_7处于较高水平），且施工期控蚀闭环（C_3，C_4，C_5）与植被恢复（C_6，C_8）能够形成良性循环，从而使综合分稳定偏高。典型低分项目多，表现为末端调蓄与入渗设施不足，透水铺装堵塞或失效，设施衔接差导致C_9偏高且C_{10}，C_{11}，C_7偏低；或施工期表土与渣土过程管理薄弱，造成“控蚀指标”和“雨洪指标”同步受损，形成短板叠加，总分较低。

4 讨 论

4.1 评价结果的有效性验证与法规一致性分析

研究选取的34个生产建设项目均已通过行政主管部门的水土保持设施验收，依据《生产建设项目水土流失防治标准》（GB 50434—2018），法律法规层面均为“合规”项目。基于EWM-FCE模型的评价结果，所有样本项目的综合得分均高于“差（Ⅴ级）”的阈值，且绝大多数处于“及格（Ⅳ级）”及以上。这表明该评价体系与现行验收制度在基本判断上保持一

致。同时,在保持合规底线一致的前提下,模型评价结果呈现出显著的区分度(46.39～85.66 分),能够反映同为“合规”项目的评价差异。对比现场调查与相关实测资料发现,高分项目(如#19,#31)在景观绿化、微地形整治及雨洪调控措施配置方面更为完善;而得分较低的公共服务设施项目(如#32)虽然满足基本水保要求,但在硬化面透水铺装与雨水调控设施的配置上存在客观短板。这种“模型得分与现场观测、实测数据的一致性”[24]证实了评价结果的解释性与可用性。

4.2　不同类型项目的差异化机制与合理性探讨

研究发现,不同类型项目的得分呈现:“房地产>市政>公共服务”的特征,这一结论与许文盛等[2]、台辉等[4]的研究结果具有相似性,但本研究进一步从“关键指标驱动-工程形态约束-提升性指标适配性”角度对差异形成机制进行了细化解释。

房地产项目(资金与景观驱动型)得分最高,主要得益于其充足的资金投入与对景观品质的高要求[25]。本研究证实,房地产项目往往通过微地形塑造与高标准的园林绿化,提高了雨洪调控相关指标[26](如场地综合径流系数 C_9,雨水径流控制率 C_{10})。由此可见,商业开发项目的景观需求在实践中常与低影响开发(LID)设施形成协同,进而提升场地雨洪调控能力[27]。

市政工程项目(线性连通受阻型)得分居中,主要受线性工程“距离长,节点多,衔接复杂”的影响[28]。与张洪达等[6]的研究类似,本文发现市政道路虽有透水铺装,但往往因雨水管网与绿地高程衔接不当,设施间连通不足,径流控制链出现“断点”,使雨水径流控制率(如 C_{10})指标难以充分发挥作用。这说明线性工程即便增加单项设施规模,若水力连通关系未打通,C_{10} 等指标也难以提升综合绩效。因此,市政项目更应重视高程衔接、溢流路径与设施串联。

公共服务设施项目(功能优先下的基础达标型)得分(58.38)在 3 类项目中相对较低,但这并不意味着该类项目“不合格”或存在违规。本研究选取的样本项目均已通过严格的水土保持设施行政验收,完全满足国家强制性标准的底线要求。造成其综合得分偏低的主要原因在于本评价体系引入了体现高质量发展的“海绵城市”与“生态景观”类指标(如 C_9,C_{10})。公共服务设施(如地下管廊、学校等)通常具有“用地紧凑,硬化率高,财政预算固定”的特点[29],建设目标以保障城市核心服务功能为主[30],相比房地产开发项目在提升性措施配置空间上更加受限。因此,该类项目通常具有“合规达标但绩效提档困难”的特征。因此,在监管与政策引导中,应充分考虑项目类型差异,为公共服务设施设置更具可达性的分级目标与改造路径。

4.3　基于自主验收制度视角的管理启示

当前,中国生产建设项目水土保持全面实施自主验收制度,建设单位作为责任主体,负责报告编制、验收公示及报备等全流程工作。该制度改革有助于提升效率与激发主体责任,但在实践运行中也容易出现“以核查为目标”的倾向,导致验收工作停留在达标层面的阈值判定,缺乏追求更高水保生态绩效的动力。

本研究构建的 EWM-FCE 评价体系,能从以下两个维度为现行自主验收制度提供补充。在验收报告编制阶段,建设单位可利用该模型进行预评价。不同于传统验收仅得出“合格”“不合格”的二元结论,该模型能给出具体的绩效等级(Ⅰ—Ⅴ级)与综合得分,直观反映项目在“径流调控链”或“植被措施”上的短板。这种量化反馈机制有助于引导企业从被动的“合规应付”向主动的“查漏补缺”与“品质提升”转变。在报备核查阶段,监管部门面对大量验收材料,难以对所有项目开展同强度复核。基于本研究揭示的评分结果和权重规律,可实施差异化的重点核查策略。对于得分处于“刚达标”或关键权重指标表现薄弱的项目(如 C_2,C_9),优先开展现场复核与重点核查;对评分较高且关键指标稳定的项目,可采取抽查为主。这样既能提高核查的针对性,也能更有效地识别“表面达标、关键环节薄弱”的风险项目。

4.4　研究局限

尽管本研究实现了对城市水土保持效果的量化分级,但仍存在不足。①评价模型侧重于地表生态与水文过程的综合绩效评价。对于弃渣场深层抗滑稳定等岩土工程安全指标,虽然通过“渣土防护率”进行了过程表征,但无法替代专业的岩土安全评估。对于涉及高风险弃渣场的项目,仍需结合专门的安全监测数据进行综合研判。②本评价主要基于竣工验收时的静态数据,由于缺乏运营期(如验收后 3～5 a)的跟踪监测数据,评价结果难以完全反映水土保持措施的长效稳定性。③研究样本局限于西安市,其指标权重(如对径流系数的高敏感性)受气候特征的显著影响,对于降雨充沛的南方城市或干旱的西北其他区域,该指标体系的权重阈值需做适应性调整。

5　结　论

(1) 构建了融合海绵城市理念的量化评价模型。

针对传统验收评价“侧重合规判定,难以区分优劣”的局限,本研究构建了基于熵权-模糊综合评价(EWM-FCE)的指标体系。该模型能有效识别同为“合格”项目的绩效差异,实现了从定性“阈值判定”向定量“绩效分级”的量化评价。

(2)揭示了不同类型项目的绩效分异特征。评价结果显示,综合得分总体呈现:房地产开发(72.54)>市政工程(65.03)>公共服务设施(58.38)的梯度分布。其中,房地产项目因资金投入与景观需求较高,整体水保效果评价相对领先;公共服务设施项目严格遵循国标底线,但受限于紧凑用地与功能导向,多处于基础达标水平。

(3)明确了“径流调控链”是提升绩效的核心机制。场地综合径流系数(C_9)与雨水径流控制率(C_{10})是影响综合评价结果的核心指标。高分项目通常具备“渗-滞-蓄-排”环节协同与水力联通顺畅的特征;而低分项目常受制于下凹式绿地配置不足或设备衔接较差,导致“断点效应”。

(4)提出了分类施策的差异化提质路径。市政工程应优先解决线性空间的水利连通关键节点,并补齐调蓄与入渗薄弱环节;房地产开发应将表土及渣土闭环管理设为强约束,巩固其生态优势;公共服务设施应采取整体多项指标提升的策略,优先解决基础径流调控能力不足的问题。

参考文献(References)

[1] 程冬兵,赵元凌,孙宝洋,等.小流域水土流失治理优先度的评价与应用[J].农业工程学报,2023,39(22):104-111.
Cheng Dongbing, Zhao Yuanling, Sun Baoyang, et al. Evaluation and application of the management priority of soil erosion in small watersheds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22):104-111.

[2] 许文盛,张文杰,张志华,等.中国城市水土保持研究进展与发展趋势[J].中国水土保持科学,2025,23(2):1-8.
Xu Wensheng, Zhang Wenjie, Zhang Zhihua, et al. Research progress and development trend of urban soil and water conservation in China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):1-8.

[3] Zou Chao, Zhu Jiwei, Lou Kailun, et al. Coupling coordination and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecological environment in Shaanxi Province, China [J]. Ecological Indicators, 2022,141:109152.

[4] 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):169-175.
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):169-175.

[5] 王敏,韦杰,唐强,等.农户参与水土保持的福利效应:概念、内涵与评价指标框架[J].水土保持通报,2023,43(6):256-262.
Wang Min, Wei Jie, Tang Qiang, et al. Welfare effect of farmers' participation in soil conservation concept, connotation and evaluation index framework [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):256-262.

[6] 张洪达,赵传普,戴玉婷,等.群落尺度植被水土保持功能评价模型的构建:以大别山北麓安徽省金寨县为例[J].水土保持通报,2022,42(1):122-129.
Zhang Hongda, Zhao Chuanpu, Dai Yuting, et al. Construction of evaluation model for soil and water conservation function of vegetation at community scale: Taking Jinzhai County, Anhui Province at northern foot of Dabie Mountains as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):122-129.

[7] Guo Jianchao, Chen Jiadong, Qi Shi. Impact of land use/cover change on soil erosion and future simulations in Hainan Island, China [J]. Water, 2024,16(18):2654.

[8] 李梦丽,杨忠莲,王楚亚,等.基于熵权法-模糊综合评价模型的生活污水低碳处理模式评价[J].环境工程学报,2025,19(6):1327-1338.
Li Mengli, Yang Zhonglian, Wang Chuya, et al. Evaluation of low-carbon treatment modes for domestic wastewater based on an entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025,19(6):1327-1338.

[9] 赵经华,马世骄,房城泰.基于熵权-模糊综合评价法的无人机多光谱春玉米长势监测模型研究[J].农业机械学报,2024,55(8):214-224.
Zhao Jinghua, Ma Shijiao, Fang Chengtai. Growth monitoring of spring maize using UAV multispectral imaging based on entropy weight-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):214-224.

[10] 吴晟,乔明,史斌,等.层次分析法和熵权法模糊综合评价水泥混凝土路面结构性能[J].济南大学学报(自然科学版),2024,38(4):503-509.
Wu Sheng, Qiao Ming, Shi Bin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on structural performances of cement concrete pavements based on analytic hierarchy process and entropy weight method [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2024, 38(4):503-509.

[11] 原彩萍,刘原一,职璐爽.基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J].水资源保护,2021,37(5):112-116.

Yuan Caiping, Liu Yuanyi, Zhi Lushuang. Water resources vulnerability assessment in Shanxi Province based on fuzzy set pair method [J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):112-116.

[12] Ou Bin, Gong Aimin, He Chunxiang, et al. Dynamic evaluation of water source safety based on fuzzy extension model [J]. Membrane Water Treatment, 2019,10(2):149-154.

[13] Pan Lipeng, Deng Yong. Probability transform based on the ordered weighted averaging and entropy difference [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2020,15(4):3743.

[14] Sit A J, Toris C B, Gulati V, et al. Objective grading of tonography tracings for the measurement of outflow facility [J]. Translational Vision Science & Technology, 2025,14(2):10.

[15] Zhang Xiaobo, Wang Chengshan, Fan Jie, et al. Optimizing the analytic hierarchy process through a suitability evaluation of underground space development in Tonghu District, Huizhou City [J]. Energies, 2020,13(3):742.

[16] 夏积德,吴发启,丛佩娟,等.水土保持技术服务信用评价的指标体系构建:以水土保持方案编制技术服务为例[J].水土保持通报,2016,36(3):304-308.
Xia Jide, Wu Faqi, Cong Peijuan, et al. Establishment of credit evaluation index system for soil and water conservation technical service: Taking technical service on soil and water conservation plan as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 304-308.

[17] Chen Hongyu, Cheng Shidong, Qin Yawei, et al. Sustainability evaluation of urban large-scale infrastructure construction based on dynamic fuzzy cognitive map [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,449:141774.

[18] Zhang Xianqi, Qiao Wenbao, Lu Yaohui, et al. Construction and application of urban water system connectivity evaluation index system based on PSR-AHP-fuzzy evaluation method coupling [J]. Ecological Indicators, 2023,153:110421.

[19] Ricotta C, Feoli E. Hill numbers everywhere. Does it make ecological sense? [J]. Ecological Indicators, 2024,161:111971.

[20] 刘冲,张辉,吴群锋.进口竞争与企业产品专业化:基于中国多产品企业的研究[J].国际贸易问题,2020(3):22-39.
Liu Chong, Zhang Hui, Wu Qunfeng. Import competition and firms' product specialization: A study on Chinese multi-product firms [J]. Journal of International Trade, 2020(3):22-39.

[21] Radford J Q, Bennett A F, Cheers G J. Landscape-level thresholds of habitat cover for woodland-dependent birds [J]. Biological Conservation, 2005, 124(3): 317-337.

[22] 郑艳,翟建青,武占云,等.基于适应性周期的韧性城市分类评价:以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例[J].中国人口·资源与环境,2018,28(3):31-38.
Zheng Yan, Zhai Jianqing, Wu Zhanyun, et al. A typology analysis on resilient cities based on adaptive cycle: Taking cases of Chinese sponge cities and climate resilient cites pilot projects [J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(3):31-38.

[23] Yang Xiaojie, Hao Zhenli, Liu Keyuan, et al. An improved unascertained measure-set pair analysis model based on fuzzy AHP and entropy for landslide susceptibility zonation mapping [J]. Sustainability, 2023, 15(7):6205.

[24] Ruiz F, El Gibari S, Cabello J M, et al. MRP-WSCI: Multiple reference point based weak and strong composite indicators [J]. Omega, 2020,95:102060.

[25] Sabbagh M, Browne D, Pickering L, et al. Urban stormwater bioretention reduces runoff and improves water quality: A global Meta-analysis of field studies [J]. Journal of Hydrology, 2025,663:134163.

[26] Razzaghmanesh M, Beecham S. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes [J]. Water, 2018,10(3):337.

[27] Zha Xianbao, Fang Wei, Zhu Wei, et al. Optimizing the deployment of LID facilities on a campus-scale and assessing the benefits of comprehensive control in sponge city [J]. Journal of Hydrology, 2024, 635: 131189.

[28] Lashford C, Charlesworth S, Warwick F, et al. Modelling the role of SuDS management trains in minimising flood risk, using MicroDrainage [J]. Water, 2020,12(9):2559.

[29] Luo Pingping, Yan Peiyao, Wang Xiaohui, et al. Historical and comparative overview of sponge campus construction and future challenges [J]. Science of the Total Environment, 2024,907:167477.

[30] Wang Jia, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. A multi-objective optimization model for synergistic effect analysis of integrated green-gray-blue drainage system in urban inundation control [J]. Journal of Hydrology, 2022,609:127725.