

小流域水保工程配置优化对生态系统服务功能协同提升机制研究

崔婷婷

四川省都江堰勘测设计院有限责任公司，四川成都 611830

DOI:10.61369/WCEST.2025090011

摘要：以典型小流域为研究对象，构建水保工程措施配置结构与生态系统服务功能之间的耦合分析框架，综合运用情景模拟与系统动力学方法，探讨不同工程组合模式对水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能的协同作用机理。研究发现，合理优化坡改梯、植被恢复与谷坊等工程配置比例，可显著提升流域生态服务综合效益，并有效缓解单一治理模式下功能失衡问题。成果为小流域综合治理方案优化及生态效益评估提供理论依据。

关键词：小流域治理；工程配置优化；生态服务功能；协同机制；水土保持

Study on the Mechanism of Synergistic Enhancement of Ecosystem Service Functions through Optimization of Soil and Water Conservation Engineering Configuration in Small Watersheds

Cui Tingting

Dujiangyan Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611830

Abstract : Taking typical small watersheds as the research objects, this study constructs a coupling analysis framework between the configuration structure of soil and water conservation engineering measures and ecosystem service functions. By comprehensively employing scenario simulation and system dynamics methods, it explores the synergistic mechanisms of different engineering combination patterns on water conservation, soil conservation, biodiversity, and carbon sequestration functions. The study finds that reasonably optimizing the configuration proportions of engineering measures such as slope-to-terrace conversion, vegetation restoration, and check dams can significantly enhance the comprehensive ecological service benefits of the watershed and effectively alleviate the functional imbalance issues under a single management model. The results provide a theoretical basis for optimizing comprehensive management plans and assessing ecological benefits in small watersheds.

Keywords : small watershed management; engineering configuration optimization; ecosystem service functions; synergistic mechanism; soil and water conservation

引言

小流域作为区域水土流失最为集中且治理单元最具针对性的空间尺度，其生态系统稳定性直接关系区域水资源安全与生态环境质量。长期以来，小流域水土保持工程多以单一防护或拦截功能为导向，忽视不同工程措施之间的结构配置与生态系统服务功能之间的协同关系，导致治理效益分散、生态功能提升有限，相关研究已对小流域蓄排措施布局及优化模式进行了系统梳理^[1]。随着生态文明建设与流域综合治理理念的深化，推动水保工程从“单点治理”向“系统优化”转型已成为必然趋势。基于生态系统服务视角，探讨不同工程配置模式对水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能的协同提升机制，对于提高小流域治理的科学性与精准性具有重要理论价值和实践意义。本研究以典型小流域为对象，构建工程配置与生态服务功能之间的耦合分析框架，旨在为优化水土保持工程布局和提升综合生态效益提供依据。区域尺度的研究表明，土地利用格局演变对四川省生态系统服务价值产生了显著影响^[2]。

一、理论基础与研究方法

(一) 小流域水保工程配置体系

小流域水土保持工程配置是指在特定流域空间范围内，基于地形地貌、水文特征和水土流失类型，对不同水土保持措施进行合理组合与空间优化布局的过程，其核心在于通过多措施协同控制径流形成、削减水流能量并稳定地表结构，从而实现水土流失防治与生态功能提升的双重目标。当前，小流域水保工程主要包括工程措施、植物措施和农艺措施三大类型，其中坡改梯、谷坊等工程措施侧重于削减坡面径流速度和拦截泥沙输移，植被恢复、封禁育林等植物措施通过提高地表覆盖率增强土壤抗蚀性，而覆盖种植、轮作管理等农艺措施则在改善土壤结构方面发挥辅助作用。不同措施在空间尺度上的配置比例及其组合方式，直接决定了流域水保治理的综合效能，因此有必要从系统视角对其结构优化进行深入研究。

(二) 生态系统服务功能构成

生态系统服务是指生态系统为人类社会提供的各种直接或间接利益，本研究结合小流域治理目标，选取水源涵养、土壤保持、生物多样性维护与碳汇调节四类功能作为评价重点。其中，水源涵养功能主要体现流域对降水的滞蓄作用及对径流过程的调节能力；土壤保持功能反映地表侵蚀控制效果；生物多样性体现生态系统稳定性与恢复程度；碳汇功能则是衡量生态修复对碳循环及气候调节贡献的重要指标。上述功能相互关联，共同构成小流域生态系统服务综合体系，相关研究从生态系统服务协同视角对土地利用及功能模拟进行了深入分析^[3]。

(三) 工程配置与生态功能耦合机制

不同水保工程措施通过改变地表粗糙度、坡面结构与水流路径，影响坡面产流过程与土壤水分动态分布，从而调控侵蚀强度与植被生长条件，形成“工程配置—水文过程—土壤改良—植被恢复—生态反馈”的耦合链条。在合理配置条件下，各类措施之间通过正反馈机制实现协同效应，如梯田削减径流、拦沙坝促进沉积稳定、植被恢复增强固土能力，共同推动多生态服务功能的同步提升。

(四) 协同效应评价模型构建

为定量反映不同工程配置模式对生态系统服务功能的综合影响，引入生态服务协同指数模型：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n w_i E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2}} \quad \text{式 (1)}$$

式中， S 为生态服务协同指数， E_i 为第*i*类生态系统服务功能值， w_i 为其对应权重， n 为评价功能数量。该模型通过综合权重分配与标准化处理，能够有效表征不同工程配置下多功能之间的协调程度，为后续小流域水保工程优化提供量化依据和技术支撑，同时为水土保持碳汇效应量化研究提供理论基础^[4]。

二、研究区概况与情景设定

(一) 研究区自然条件

本研究选取四川丘陵区及西南典型土石山区小流域作为样本区，流域总面积约12.6 km²，地形以沟壑纵横的丘陵坡地为主，坡度整体分布在5°—25°之间，局部坡面超过30°，地形破碎度高，坡沟系统发育明显，属典型的中度至强度水土流失区。区域多年平均降水量约520 mm，降水时空分布不均，夏季暴雨频发，降雨强度大、历时短，易形成强烈坡面径流并引发严重侵蚀，水土流失问题突出。

从生态环境角度看，研究区植被覆盖率整体偏低，天然植被以灌草为主，乔木覆盖不足，局部区域存在明显裸露地表。土壤类型以黄绵土和褐土为主，质地疏松、结构稳定性差，抗蚀能力弱，在强降雨条件下极易发生冲刷与崩塌。受长期人为活动和不合理利用方式影响，流域生态系统结构失衡，亟需通过科学合理的水土保持工程配置实现系统性修复与功能提升。

(二) 数据来源与分析指标

本研究所用数据主要来源于实地调查、遥感解译、水文监测站记录以及历史水土保持普查资料。通过布设监测断面采集径流量、降雨量和泥沙含量等数据，结合无人机航拍影像获取地表覆盖情况，并利用多源遥感影像反演植被覆盖度和NDVI指数，从而提高数据的空间精度与时间连续性。土壤理化性质数据则通过采样分析获取，包括土壤有机质含量、含水率及抗蚀性能参数。

在指标体系构建方面，围绕生态系统服务功能选取水源涵养能力、土壤保持能力、生物多样性指数和碳汇潜力四个核心指标。其中，水源涵养以径流削减率和调蓄量为表征，土壤保持以侵蚀模数变化为主要评价指标，生物多样性采用植被覆盖率与物种丰富度指数，碳汇功能结合植被生物量和土壤有机碳储量进行综合测算，形成较为完整的评价指标体系。

(三) 工程配置情景构建

基于研究区现状水土流失特点和治理基础，构建三种对比工程配置情景，用于分析不同组合模式对生态系统服务功能的影响。情景A为工程主导型，重点加强坡改梯和谷坊建设，提高地表拦截能力；情景B为生态主导型，以植被恢复和封禁育林为核心，注重提升植被覆盖度；情景C为工程—生态复合型，通过合理比例搭配工程措施与植物措施，实现结构协同。

在情景构建过程中，充分考虑不同措施在空间分布上的合理性与功能互补性，如在坡面上部布设梯田减缓径流，在坡面汇流关键节点布设谷坊控制泥沙输移，同时在缓坡区强化植被恢复，形成多层次防护体系。通过比较三种情景下生态服务功能的响应特征，分析最优配置模式，为后续小流域治理优化提供科学依据。

三、不同配置模式下生态服务协同效应分析

(一) 水源涵养效应分析

不同工程配置模式对小流域水源涵养能力的影响具有显著差异。工程主导型配置通过坡改梯和谷坊削减坡面径流速度，在一定程度上提高了水体的滞蓄能力，但整体调蓄效果仍受植被覆盖不足的制约。生态主导型配置则依托大面积植被恢复增强地表入渗能力，对径流过程起到较好的缓冲作用，而复合协同型配置在工程措施与植被恢复的共同作用下，实现了径流削减与水分滞蓄的双重强化，表现出更为稳定的水源涵养能力。整体来看，复合型配置在改善流域水文过程方面具有明显优势。

为直观展示不同配置模式下水源涵养及其他生态服务功能的差异特征，现对各项指标进行综合对比，结果如表1所示。

表1 不同工程配置模式下生态系统服务功能对比

指标类别	模式 A 工程 主导型	模式 B 生态 主导型	模式 C 复合 协同型
径流削减率 (%)	22.5	28.1	35.6
土壤侵蚀模数 ($t/km^2 \cdot a$)	4200	3600	2900
植被覆盖率 (%)	56	68	79
生物多样性指数	0.42	0.57	0.69
年碳汇量 (t/km^2)	3.2	4.7	6.3
生态服务协同指数 S	0.64	0.72	0.86

从表1可以看出，不同工程配置模式对小流域生态系统服务功能的影响存在显著差异。其中，复合协同型配置模式（模式C）在径流削减、土壤侵蚀控制、植被覆盖度、生物多样性水平及碳汇能力等方面均表现出最优效果，其生态服务协同指数达0.86，明显高于工程主导型与生态主导型，表明合理整合工程措施与植物措施能够有效提升多功能协同水平，实现生态效益的整体优化，与相关流域生态系统服务协同研究结论具有一致性^[5]。喀斯特山区的相关研究同样表明，不同功能分区下生态系统服务在时空上呈现出显著的权衡与协同特征^[6]。

(二) 土壤保持效应分析

土壤保持能力是衡量水土保持工程成效的关键指标之一。模式A在减少坡面径流冲刷方面起到一定作用，但由于缺乏持续的植被覆盖支撑，局部区域仍易出现再侵蚀现象。模式B通过提升植被覆盖率显著增强了地表抗蚀能力，使土壤侵蚀强度明显下降，而模式C在工程削能和植被固土的双重作用下，侵蚀模数降幅最为显著，表明其在稳定土体结构和减少泥沙输出方面优势明显。

(三) 生物多样性变化特征

不同配置模式对流域生物多样性水平的影响呈现出递增趋势。工程主导型配置对物种生境改善作用有限，植被类型较为单

一；生态主导型配置通过恢复本地植被群落，提高了物种丰富度，但其稳定性仍受极端气候影响；复合型模式在优化地形结构和改善生境条件的基础上，为多种植物和微生物提供适宜环境，使生物多样性指数显著提升，生态系统结构更加稳定。

(四) 碳汇功能响应

从碳汇角度分析，工程主导型配置对碳固定贡献较低，主要体现在土壤沉积层的被动碳储存，已有研究从坡面尺度揭示了水土保持措施对碳流失与固存过程的影响机制^[7]。生态主导型配置则通过植被生物量增加显著提升固碳能力，而复合协同型配置在兼顾植被恢复和土壤结构优化的基础上，实现了土壤有机碳和植被固碳的同步增长，其年碳汇量表现出最优水平，进一步凸显了工程与生态协同配置对“双碳”目标的积极促进作用。川西北高山峡谷区的森林碳储量及其空间分布特征研究进一步从区域尺度印证了植被恢复与保护对提升碳汇功能的重要性^[8]。

总体而言，不同工程配置模式在生态服务功能表现上存在显著差异，其中复合协同型模式在水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能四个方面均表现最优，体现出明显的协同提升效应，为小流域综合治理提供了更具可持续性的技术路径。

四、配置优化路径与结论

(一) 工程配置优化原则

小流域水土保持工程配置优化应遵循系统性、生态性与可持续性相结合的基本原则。首先，应坚持“生态优先、协同治理”的理念，在满足水土流失防控需求的基础上，注重生态系统整体结构的优化与功能协调。其次，应遵循因地制宜原则，根据地形地貌、水文条件及侵蚀特征差异，合理确定不同措施的空间布局与比例关系，避免“一刀切”式配置模式。此外，还应突出多目标统筹原则，在实现减流固土的同时兼顾生物多样性保护和碳汇功能提升，促进生态、经济与社会效益的协同发展。

(二) 配置优化技术路径

从技术实践角度出发，小流域水保工程配置应构建“工程措施—植物措施—农艺措施”三位一体的复合体系。在坡面上部优先布设坡改梯，削减径流能量并延缓汇流速度，在坡面汇流点或沟头关键节点布设谷坊以控制泥沙输移，同时在缓坡区域加强植被恢复，形成“上拦、中控、下护”的梯级防护结构。此外，可通过优化梯田间距、增加植被带宽及改善沟坡稳定结构，提高水分入渗率和土壤持水能力，从而形成稳定的生态恢复循环路径，推动小流域生态系统由被动修复向主动调控转变。

(三) 管理与实践建议

在工程配置优化过程中，应同步强化管理机制与政策保障。一方面，建立完善的动态监测与评估体系，运用遥感监测与信息化手段实时评估工程效益变化，实现治理过程的精细化管理；另一方面，加大生态补偿和政策扶持力度，引导社会资本参与水土

保持工程建设，提高项目可持续运行能力。同时，还应加强基层治理能力建设，推动公众参与和生态意识提升，形成政府主导、社会协同、公众参与的多元治理格局，增强小流域水土保持的长效性。

（四）主要结论

综合研究结果表明，合理优化水保工程配置结构是提升小流域生态系统服务功能协同效益的关键路径。复合协同型配置模式在水源涵养、土壤保持、生物多样性及碳汇功能等方面均展现出

显著优势，其生态服务协同指数明显高于单一配置模式，充分体现了多措施协同作用的优越性。研究同时验证了协同评价模型在反映工程配置综合效应中的适用性，为小流域治理提供了可操作的技术支撑。总体而言，推进工程配置科学优化不仅有助于改善流域生态环境质量，也对实现区域可持续发展和生态安全保障具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈玉兰, 韩剑桥, 焦菊英, 徐倩, 陈同德, 李建军, 王楠, 白雷超. 小流域水土保持蓄排措施布局研究综述 [J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(2): 132–143.
- [2] 罗芳, 潘安, 陈忠升, 张寒. 四川省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(4): 734–744.
- [3] 荣圣淇, 丁欣明, 余欣. 面向水土生态系统服务协同的土地利用模拟 [J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9470–9484.
- [4] 曹文洪, 张晓明, 张永娥, 刘冰, 王友胜, 赵阳. 水土保持碳汇内涵与测算方法 [J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 1–11.
- [5] 周怡宇, 张自正, 关颖慧, 林一诚, 周金星, 刘玉国. 小滦河流域生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究 [J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(6): 126–135.
- [6] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 李益敏, 黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区 [J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736–756.
- [7] 王璞, 任宗萍, 马晓妮, 王凯博, 董彭蓓, 贺国凯. 黄土坡面溶解性碳流失特征及其对水土保持措施的响应 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 48–56, 64.
- [8] 吴胜义, 王飞, 徐千君, 马浩, 党禹杰, 吴菲. 川西北高山峡谷区森林碳储量及空间分布研究——以四川洛须自然保护区为例 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1735–1744.