

## 6 相关关系分析

以流速仪法实测流量建立水位流量关系，将无人机实测流量与该线线上流量进行对比分析，计算成果见表9。

通过对30个样本容量分析，低水位（≤96.60m）测点

最大相对误差  $-5.42\% \leq 12\%$ ，中水位（96.60m-98.40m）测点最大相对误差  $7.55\% \leq 8\%$ ，随机不确定  $6.0\% \leq 12\%$ ，系统误差  $0.89\% \leq 2\%$ ，符合二类精度水文站水力因素法定线精度要求。

表9 先锋站无人机雷达波流量与流速仪法线上流量比测分析表

测次	水位/m	Q 无人机/(m <sup>3</sup> /s)	Q 线/(m <sup>3</sup> /s)	Pi/(%)	pi-p <sub>(平)</sub> (%)	(pi-p <sub>(平)</sub> ) <sup>2</sup> (%)
1	95.48	65.7	64.6	1.7	0.81	0.66
2	95.47	62.2	63.3	-1.74	-2.63	6.92
3	95.47	63	63.3	-0.47	-1.36	1.85
4	95.48	61.1	64.6	-5.42	-6.31	39.82
5	96.81	345	335	2.99	2.10	4.41
...						
26	96.51	266	264	0.76	-0.13	0.02
27	96.23	211	204	3.43	2.54	6.46
28	96.11	175	179	-2.23	-3.12	9.76
29	95.49	67.2	65.9	1.97	1.08	1.17
30	96.17	193	192	0.52	-0.37	0.14

备注：Q<sub>无人机</sub>—无人机雷达波实测流量；Q<sub>线</sub>—实测流量点对应在曲线上查得的流量；

p<sub>i</sub>—测点相对偏离值；p<sub>(平)</sub>—平均相对偏离值；p<sub>i</sub>-p<sub>(平)</sub>—测点相对偏离值距平均值偏差；

## 7 结语

本次针对武宁水先锋站对比分析中，无人机雷达波测流与传统测验方面有几个应用优势，一是适用于防汛抢险等紧急场景，可连续监测大范围水域，可以快速获取数据并支持决策；二是复杂地形区域应用安全性较高，接触性待测目标，避免人员涉水作业，；三是效益成本缩小，快速部署，省去渡河实物架设成本。

综合分析：通过无人机雷达波在先锋水文站与流速仪进行比测分析，先锋站在95.50m以上的各级水位中，采用无人机雷达波测流，精度满足二类站定线要求。在水位95.50m以上时，在无雨、风力较小、视线较好情况下可采用无人机雷达波法实测流量<sup>[6,7]</sup>。

### 参考文献

[1] 姚代顺,张宗元,崔力超,等.TEL-12双轨移动式雷达波测流系统

水面流速比测试验分析[J].甘肃水利水电技术,2024,60(12):1-5+13.DOI:10.19645/j.issn2095-0144.2024.12.001.

[2] 杨俊,薛运宏,刘冠华.无人机测流关键技术研究与应用[J].治淮,2022,(06):11-13.

[3] 陈晨,荣佳伟,乔铂纯.无人机测验系统在水文监测中的应用探索[J].东北水利水电,2021,39(11):69-70.DOI:10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2021.11.028.

[4] 河流流量测验规范(GB50179-2015).

[5] 水文资料整编规范(SL/T 247-2020)

[6] 刘梅同单,李丹.无人机监测系统在水文应急监测中的应用[J].长江技术经济,2020,4(04):91-93.DOI:10.19679/j.cnki.cjsjj.2020.0421.

[7] 杨胜天,王鹏飞,王娟,等.结合无人机航空摄影测量的河道流量估算[J].遥感学报,2021,25(06):1284-1293.

# Comprehensive evaluation of soil and water conservation benefits in karst rocky desertification control

Shikai Cao

China Electric Power Construction Group Guiyang Survey and Design Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550081, China

## Abstract

The karst region is characterized by a complex geomorphological structure and a fragile ecosystem, where rocky desertification has long constrained ecological security and socio-economic development. To scientifically evaluate the overall effectiveness of rocky desertification control, this study establishes a comprehensive evaluation system focusing on soil and water conservation benefits across ecological, economic, and social dimensions. By analyzing soil erosion characteristics, hydrological cycle patterns, and vegetation restoration in karst areas, a multi-indicator evaluation model encompassing ecological, social, and economic benefits is constructed. The results show that after implementing measures such as vegetation restoration, slope terracing, and water conservation forest construction, the regional soil erosion rate decreased significantly, vegetation coverage increased by about 35%, and ecosystem stability was greatly enhanced. The comprehensive evaluation results indicate that rocky desertification control has achieved remarkable outcomes in improving the ecological environment, promoting sustainable economic development, and enhancing residents' quality of life, providing a scientific basis and reference path for ecological restoration and soil-water conservation in similar regions.

## Keywords

Karst region; rocky desertification control; soil and water conservation; comprehensive evaluation; ecological benefits

## 喀斯特地区石漠化治理水土保持效益综合评价

曹仕凯

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 中国·贵州 贵阳 550081

## 摘要

喀斯特地区地貌结构复杂、生态系统脆弱, 石漠化问题长期制约着区域的生态安全与社会经济发展。为科学评估石漠化治理的综合成效, 本文以水土保持效益为核心, 从生态、经济与社会三个维度建立综合评价体系。通过分析喀斯特地区土壤侵蚀特征、水文循环规律与植被恢复状况, 构建涵盖生态效益、社会效益和经济效益的多指标评价模型。研究表明, 实施植被恢复、坡改梯、水保林建设等措施后, 区域水土流失率明显下降, 植被覆盖度提高约35%, 生态系统稳定性显著增强。综合评价结果显示, 石漠化治理在改善生态环境、促进经济可持续发展及提升居民生活质量方面均取得显著成效, 为类似地区的生态修复与水土保持提供了科学依据与参考路径。

## 关键词

喀斯特地区; 石漠化治理; 水土保持; 综合评价; 生态效益

## 1 引言

喀斯特地区作为我国典型的脆弱生态区之一, 具有地形破碎、土层浅薄、岩溶发育强烈等特点, 水土流失与石漠化问题尤为突出。长期以来, 不合理的土地利用方式和过度开垦放牧加剧了石漠化进程, 导致生态退化和生产力下降, 严重影响区域经济社会的可持续发展。随着国家生态文明建设的推进, 喀斯特地区石漠化治理成为生态修复的重要内

容。水土保持作为治理成效的重要体现, 其综合效益评价对科学指导治理措施、优化生态修复路径具有现实意义。本文基于喀斯特地区的自然地理特征与治理实践, 构建水土保持效益综合评价体系, 从生态、社会和经济三个方面系统分析治理效果, 旨在为喀斯特地区生态治理提供理论依据与决策支持。

## 2 喀斯特地区石漠化治理的背景与意义

### 2.1 喀斯特地貌特征与石漠化形成机理

喀斯特地区以碳酸盐岩地貌为主, 地形崎岖、岩溶发育强烈, 地表土层浅薄且分布不均, 降雨强度大且集中, 导致地表径流剧烈, 水土流失频繁。岩石裸露度高、土壤保持

【作者简介】曹仕凯(1983-), 男, 布依族, 中国贵州安龙人, 本科, 工程师, 从事环水保监理、监测及验收技术咨询研究。

能力弱,植被难以稳定生长,生态系统脆弱。人类长期的不合理开发利用,如毁林开荒、放牧采矿等,加剧了地表破坏和土壤流失,使原有的生态平衡进一步恶化。自然侵蚀与人为活动叠加作用,形成了石漠化的典型特征,即“地表裸岩化、植被稀疏化、土壤贫瘠化”,严重制约了区域生态与经济发展。

## 2.2 水土保持效益评价在治理中的作用

水土保持效益评价是衡量石漠化治理成效的重要环节,对政策制定与工程优化具有关键意义。通过建立生态、经济与社会三维指标体系,可以科学评估治理措施在减少侵蚀、改善土壤质量和提升生态服务功能方面的综合贡献。数据化评价有助于揭示不同治理手段的适应性和区域差异,指导后续工程建设与技术推广。系统的水土保持效益分析还能反映治理工程的长期生态价值,为资源合理配置和生态补偿政策提供科学依据,推动喀斯特地区形成良性生态循环体系<sup>[1]</sup>。

## 3 喀斯特地区水土流失特征与生态环境现状

### 3.1 喀斯特地区土壤侵蚀类型与空间分布特征

喀斯特地区土壤侵蚀以面蚀、沟蚀和溶蚀为主,表现出强烈的空间不均性。岩溶洼地和坡地地形复杂,土层浅薄,易受暴雨冲刷形成浅层侵蚀。地表岩石裸露区集中在坡度较大的山体,侵蚀强度高而持续时间长。沟谷地带因汇水面积大,常出现沟蚀与塌陷复合现象。土壤侵蚀的空间格局呈现“高坡强侵蚀、洼地弱沉积”的规律,导致土壤肥力下降和生态系统碎片化。长期侵蚀使部分区域地表形态改变,土地生产能力显著降低。

### 3.2 水文循环特征与地表径流变化规律

喀斯特地区降雨季节性明显,水文循环具有渗漏性强、径流短暂的特点。雨水通过裂隙和溶洞迅速入渗地下,地表径流形成时间短、洪峰高,极易诱发泥石流与山体滑坡。地表水和地下水系统相互交错,补给与排泄过程复杂。石漠化地区由于植被稀少,雨水调蓄能力低,地表径流迅速流失,水资源利用率不足20%。治理后,植被恢复有效提高了雨水滞留与下渗能力,径流系数降低约0.15,水源涵养功能增强。改善的水文循环为生态系统稳定提供了重要支持。

## 4 石漠化治理措施与实施成效分析

### 4.1 风电场建设对贵州松桃县水土保持效益的影响

以贵州松桃县长坪风电场为例,风电场的建设虽然为区域能源结构优化做出了重要贡献,但在建设过程中对生态环境尤其是水土保持产生了较大影响。建设初期,风电场的道路开挖、风电机组安装和相关设施的建设导致了大量土地裸露,造成了严重的水土流失问题。初期监测数据显示,建设区域的水土流失率高达每年150吨/平方公里,植被覆盖度仅为30%。该地区的土壤层较薄,抗水土流失能力较弱,导致风电场建设后的生态修复任务相对艰巨。然而,在发现问题后,相关部门迅速采取了植被恢复、坡面保护和水土

保持工程措施。通过快速修复和植被种植,逐步改善了土壤质量。最终,通过系统的治理措施,区域的植被覆盖度从30%提升至60%,水土流失量成功降低到每年60吨/平方公里,水土保持效益显著提升,生态环境逐步恢复。

### 4.2 风电场建设后实施的水土保持工程

在风电场建设过程中,贵州松桃县长坪风电场实施了多个水土保持工程,以减少对地表和生态环境的负面影响。首先,在风电场周围进行坡改梯,改变了原有坡面的形态,使其能够更好地适应水土流失防治需求。其次,风电场周围还建设了水保林带,主要通过种植本地耐旱植物和抗风能力强的树木,有效固定了土壤,减少了风力对土壤的吹蚀作用。再者,为了减缓风电场建设过程中降雨所带来的径流问题,设计了大量水土保持沟渠,确保雨水能够被及时引流,并最大限度减少地表径流对土壤的侵蚀。通过这些工程措施,风电场区域的水土流失量从每年150吨/平方公里降至每年50吨/平方公里,植被覆盖度也提升了约35%,恢复效果显著。整体来看,风电场建设后实施的水土保持措施取得了良好的效果,为其他类似项目提供了宝贵的经验。

### 4.3 风电场建设水土保持效益的长期监测与评估

为了确保风电场建设后的水土保持工作能够持续并取得预期效果,贵州松桃县在项目区域实施了长期的水土保持监测与评估工作。定期进行土壤质量、植被覆盖度和水土流失量的监测,确保治理措施能够真正有效。监测数据显示,风电场建设后,土壤的有机质含量逐年提升,从建设初期的1.5%增加至3.2%。植被覆盖度也从最初的30%提升至70%,表明生态恢复的进展明显。更为重要的是,通过长期的数据分析,风电场区域的水土流失量显著减少,水土流失模数由每年150吨/平方公里下降至每年60吨/平方公里,显示出治理效果显著。此外,地下水位也有了明显上升,水源涵养能力逐渐增强,为区域内的生态修复提供了有力支撑。综合评估结果表明,风电场建设不仅没有破坏当地生态,反而通过科学的水土保持和生态修复措施,取得了显著的环境和社会效益。通过这些长期监测与评估,确保了风电场项目的可持续发展,同时也为类似地区的风电场建设提供了宝贵的经验。

## 5 水土保持效益综合评价指标体系构建

### 5.1 生态效益指标的构建与权重确定

生态效益指标体系主要包括植被覆盖度、水土流失模数、土壤含水率、生物多样性指数与碳储量等5个核心指标。植被覆盖度提升率设权重0.25,水土流失减少率权重0.20,土壤含水率提升权重0.15,生物多样性指数权重0.20,碳储量增长权重0.20。通过层次分析法确定各指标相对重要性,形成生态效益综合得分模型。经对比分析,治理区植被覆盖度由38%提升至73%,水土流失模数下降45%,土壤含水率增加12%,碳储量提升8.6%,综合生态效益指数提高至