

CVOR 在山区河道整治植被恢复综合评价中的应用研究

孔维博^{1,2}, 范春梅¹, 彭尔瑞^{1*}, 尹亚敏¹, 陈旺旺³, 王洪友⁴, 蒋文翠⁵

(1. 云南农业大学, 云南 昆明 650201; 2. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南 昆明 650201; 3. 云南省水利水电勘测设计院, 云南 昆明 650201; 4. 丘北县水利工程建设中心, 云南 文山 663099; 5. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司藏木水电厂, 西藏 山南 856417)

摘要:以石葵河生态河道治理为例,将工程扰动区划分为河道工程区(Q1)、临时施工道路区(Q2)、弃渣场区(Q3)、取土区(Q4)、临时表土堆场区(Q5)等5个分区。采用层次分析法和CVOR模型,构建山区河道整治工程扰动区植被恢复综合评价模型。结果表明:Q1区植被恢复潜力最强,生态健康等级为健康,属容易恢复区,Q4区、Q5区、Q2区生态健康等级为不健康,植被恢复潜力较弱,生态修复中须加大投资;植被恢复潜力与生态系统健康评价结果基本保持一致,基况条件对植被恢复潜力影响较大,可通过人工干扰提高扰动区植被恢复潜力,提升植被恢复效果。

关键词: 植被恢复潜力; CVOR综合评价模型; 层次分析法; 山区河道整治; 工程扰动区

中图分类号: X171.4; X826 文献标志码: B 文章编号: 1006-2009(2023)02-0033-06

Application of CVOR in Comprehensive Evaluation of Vegetation Restoration for River Improvement in Mountainous Areas

KONG Wei-bo^{1,2}, FAN Chun-mei¹, PENG Er-rui^{1*}, YIN Ya-min¹, CHEN Wang-wang³,
WANG Hong-you⁴, JIANG Wen-cui⁵

(1. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650201, China; 3. Yunnan Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Kunming, Yunnan 650201, China; 4. Qiubei County Water Conservancy Construction Engineering Center, Wenshan, Yunnan 663099, China; 5. Zangmu Hydropower Plant, Huaneng Tibet the Yarlung Zangbo River Hydropower Development Investment Co., Ltd., Shannan, Tibet 856417, China)

Abstract: Taking Shikui River ecological river improvement as an example, the engineering disturbance area was divided into five areas: river engineering area (Q1), temporary construction road area (Q2), waste disposal area (Q3), borrow area (Q4) and temporary topsoil storage area (Q5). A comprehensive evaluation model of vegetation restoration in disturbed area of river regulation works in mountainous areas was established by using analytic hierarchy process and CVOR model. The results showed that Q1 had the strongest vegetation restoration potential, and the ecological health level was healthy, which was easy to recover. The ecological health level of Q4, Q5 and Q2 was unhealthy, and the vegetation restoration potential was weak, so more investment was needed in ecological restoration. The vegetation restoration potential was basically consistent with the ecosystem health assessment results. Base conditions had a great impact on the vegetation restoration potential. Artificial disturbance could improve the potential and effect of vegetation restoration in disturbed area.

收稿日期: 2022-02-21; 修订日期: 2023-01-24

基金项目: 云南省科技惠民专项计划基金资助项目(2016RA024); 云南农业大学“芒硝盐岩弃渣场生态修复与植被重建关键技术研究”基金资助项目(KX132021013)

作者简介: 孔维博(1993—), 男, 云南宣威人, 硕士, 研究方向为工程扰动区生态修复与水土保持。

* 通信作者: 彭尔瑞 E-mail: 1750272433@qq.com

Key words: Vegetation restoration potential; CVOR comprehensive evaluation model; Analytic hierarchy process; River improvement in mountainous areas; Engineering disturbance area

山区河道坡降系数大、汇流时间短、径流系数大、洪水陡涨陡落是山区河流标志性的水文特点^[1]。生态治理工程施工中,扰动原有地貌和植被会加剧生态环境恶化与生态系统退化^[2]。关于植被恢复潜力方面的研究,从内容划分看,李海东等^[3]从气象、地形和土壤等方面对植被恢复潜力进行综合评价,研究表明,气象、地形和土壤决定了植被恢复的先天条件,措施决定后天条件,通过人工促进措施可提高高寒河谷流动沙地植被恢复潜力;从研究方法看,有层次分析法、模糊综合评价法、灰色关联优势分析法、VOR/CVOR 模型评价法;从技术手段看,高海东等^[4]、赵广举等^[5]采用遥感手段和 NDVI 数据对黄土高原植被变化与植被恢复潜力进行研究,结果表明,降水量对植被恢复速度影响显著,植被恢复措施应“因水制宜”。

工程扰动加速水土流失,对生态系统造成严重威胁,减少扰动和加速植被生态修复,对维护生物多样性和生态系统健康起到主导作用。借鉴杨鑫光^[6]对高寒矿区植被恢复潜力研究模型,构建山区河道整治工程扰动区植被恢复潜力评价模型。以丘北县石葵河生态河道治理工程为依托,运用层次分析法和 CVOR 模型,对工程扰动区植被恢复潜力进行综合评价,为项目区植被生态修复提供决策依据。同时,对该模型适应性进行验证,为后期相似类型区植被恢复潜力预测提供参考^[7]。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

石葵河位于云南省丘北县东北部,属于珠江流域西江水系清水江支流,流域面积 283 km²,海拔 920 m~1 100 m,植被和水资源丰富。多年平均气温为 17.4 ℃~19.2 ℃,年降水量在 671 mm~1 468 mm 之间波动,年平均降雨量 1 143.3 mm,日照时间为 2 046 h,无霜期为 300 d~353 d;流域内土壤类型主要为红壤、砖红壤、石灰岩土,有机质含量 2%~3%,pH 值为 5.6~7.5,土壤质地疏松,通气、透水性好^[8]。境内植物资源丰富,林木有 76 科 197 种,药类 650 种,菌类 17 种。

1.2 工程扰动区分区和样地设置

按工程施工需求、扰动特点和占地类型^[9],将

工程扰动区分为河道工程区(Q1 区)、临时施工道路区(Q2 区)、弃渣场区(Q3 区)、取土区(Q4 区)、临时表土堆场区(Q5 区)等 5 个分区,其具体属性见表 1。在各工程扰动区内布设调查样地,采用样地法对研究区植被进行抽样调查^[10]。在河道工程区、临时施工道路区、弃渣场区、取土区、临时表土堆场区等 5 个分区内各布设 6 个 10 m×10 m 的乔、灌木样方,并在每个乔、灌木样方内设置 9 个 1 m×1 m 的草本样方,每种类型扰动区共计 54 个草本样方。

表 1 工程扰动区属性

Table 1 Attributes of engineering disturbance area

| 工程扰动区 | 占地面积 A/hm ² | 土壤厚度 h/m | 坡度/° | 分布类型 |
|-------|------------------------|----------|------|------|
| Q1 区 | 7.353 | 0.3~0.5 | 7~15 | 线性分布 |
| Q2 区 | 2.250 | 0.1~0.3 | 3~7 | 线性分布 |
| Q3 区 | 0.450 | 0.3~0.5 | 7~15 | 面状分布 |
| Q4 区 | 0.303 | 0.1~0.3 | 7~15 | 面状分布 |
| Q5 区 | 0.480 | 0.3~0.5 | 7~15 | 面状分布 |

1.3 植被群落特征指标计算

2018—2020 年,每年 8 月(每年该时段植被群落物种数量最丰富)实地调查样地内植被恢复情况,按乔、灌、草分类,对样方内植被种类、数量、株丛数,盖度(目测估计)、高度、频度和生长型进行调查统计,对样方的土壤层厚度、坡向和坡度测量并汇总成册。

植被群落特征指标计算包括:

重要值是某个种在群落中的地位和作用的综合数量指标。

频度 = 该种植物出现的样方数/所调查的样方总数×100 (1)

相对高度 = 某一种植物的高度/所有种高度总和×100 (2)

相对盖度 = 某一种植物的盖度/所有种盖度总和×100 (3)

相对频度 = 某一种植物的频度/所有种频度总和×100 (4)

乔、灌层重要值^[11] = (相对高度+相对盖度+相对频度)/3 (5)

藤本、草本层重要值 = (相对频度+相对盖度)/2 (6)

$$\text{Shannon-Wiener 指数}^{[12]} H = - \sum P_i \ln P_i \quad (7)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (8)$$

$$\text{Simpson 优势度指数}^{[13]} D = \sum P_i^2 \quad (9)$$

式中: P_i 为种 i 的相对重要值; S 为 i 中所在样地的物种总数, 即丰富度指数。

2 工程扰动区植被恢复潜力评价

2.1 CVOR 评价模型

VOR 评价模型主要基于对生态系统活力 (Vigor, V), 组织力 (Organization, O) 和恢复力 (Re-

silience, R) 来构建, 用于评判生态系统健康指数。在 VOR 评价模型基础上, 任继周等^[14] 引入研究区基本状况 (Condition, C) 的概念, 将研究区生态系统健康诊断指标进一步拓展和完善, 由于增加了基本状况参数, 因而具有更大的适用范围。

2.2 评价指标选取

评价指标的选取应当遵循代表性、明确性、普遍性、可行性基本原则^[15]。植被恢复潜力综合评价 CVOR 模型 (A) 由基况指数 (C)、活力指数 (V)、组织力指数 (O)、恢复力指数 (R) 等 4 个二级评价指数共同控制, 共包含 13 个三级指标因子, 见图 1。

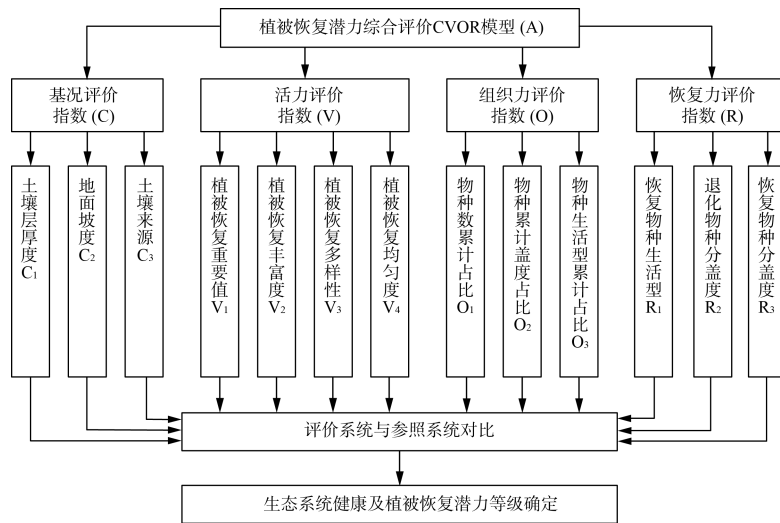


图 1 植被恢复潜力综合评价模型

Fig. 1 Comprehensive evaluation model of vegetation restoration potential

2.3 CVOR 模型计算与评价

CVOR 模型的计算值 $X = W_C \times X_C + W_V \times X_V + W_O \times X_O + W_R \times X_R$, 其中 W_C 、 W_V 、 W_O 、 W_R 为单项指数 C、V、O、R 的权重系数, 反映各单项因素的重要性, 同时避免或减轻数据背景不确定性、不均匀性或时间波动性造成的误差; X_C 、 X_V 、 X_O 、 X_R 为单项指数 C、V、O、R 的得分。CVOR 模型综合考虑了扰动区的土壤因子、植被生长力因子、群落稳定性因子、植被恢复因子, 可综合评估植被恢复潜力大小和生态系统健康程度。 $X \in [0, 10]$, X 值越大, 表明植被恢复潜力越大, 生态系统越健康; X 值越小, 表明植被恢复潜力越弱, 生态系统健康程度越低。CVOR 模型所选评价因子特征清晰、代表性强、易于计算、方法简便, 弥补了传统评价方法因子多、评

价标准难以量化、实际应用过程复杂等缺点。

2.4 工程扰动区植被恢复潜力评价指标区间的划分

在构建综合评价 CVOR 模型的基础上, 结合植被修复特征, 将评价指标进行等级量化, 划分为优 (10 分)、良 (8 分)、中 (6 分)、较差 (4 分)、差 (2 分) 5 个等级, 各定量指标的等级量化标准^[16] 见表 2。

2.5 工程扰动区生态系统健康及植被恢复潜力等级的划分

参考植被恢复潜力评价中的 CVOR 综合评判模型分级标准^[17], 采用 10 分法将工程扰动区生态系统健康状态指数和植被恢复潜力划分为 5 个不同等级, 见表 3。结合 CVOR 综合模型计算最终结果, 判断不同工程扰动区植被恢复潜力大小及生态系统健康程度^[18]。

表 2 植被恢复潜力单因子评价指标分级区间

Table 2 Grading interval of single factor evaluation index of vegetation restoration potential

| 评价因子 | 指标分级 | | | | |
|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 优(10分) | 良(8分) | 中(6分) | 较差(4分) | 差(2分) |
| 土壤层厚度 C_1 | ≥ 0.8 | [0.5,0.8) | [0.3,0.5) | [0.1,0.3) | < 0.1 |
| 地面坡度 C_2 | [0,3) | [3,7) | [7,15) | [15,25) | ≥ 25 |
| 土壤来源 C_3 | 丰富 | 一般 | 基本满足 | 缺乏 | 自身 |
| 植被恢复重要值 V_1 | ≥ 0.7 | [0.5,0.7) | [0.3,0.5) | [0.1,0.3) | < 0.1 |
| 植被恢复丰富度 V_2 | ≥ 40 | [30,40) | [20,30) | [10,20) | < 10 |
| 植被恢复多样性 V_3 | ≥ 2.0 | [1.5,2.0) | [1.0,1.5) | [0.5,1.0) | < 0.5 |
| 植被恢复均匀度 V_4 | ≥ 0.8 | [0.6,0.8) | [0.4,0.6) | [0.2,0.4) | < 0.2 |
| 物种数累计占比 O_1 | ≥ 0.8 | [0.5,0.8) | [0.3,0.5) | [0.1,0.3) | < 0.1 |
| 物种累计盖度占比 O_2 | ≥ 0.9 | [0.7,0.9) | [0.5,0.7) | [0.2,0.5) | < 0.2 |
| 物种生活型累计占比 O_3 | ≥ 10 | [8,10) | [3,8) | [0.5,3) | < 0.5 |
| 恢复物种生活型 R_1 | 乔木 | 乔灌 | 灌草 | 亚灌草 | 草本 |
| 退化物种分盖度 R_2 | ≥ 0.4 | [0.3,0.4) | [0.2,0.3) | [0.1,0.2) | < 0.1 |
| 恢复物种分盖度 R_3 | ≥ 0.8 | [0.6,0.8) | [0.4,0.6) | [0.2,0.4) | < 0.2 |

表 3 植被及生态系统恢复潜力评价等级

Table 3 Evaluation grade of vegetation and ecosystem restoration potential

| 健康指数 | 健康等级 | 恢复潜力 | 潜力描述 | |
|----------|------|--------|---------------------------|---------------------------------------|
| | | | VOR(植被恢复) | CVOR(生态系统恢复) |
| ≥ 8 | 健康 | 五级(强) | 植被生长至原生群落水平,群落结构稳定 | 生态系统正常,群落结构稳定,能够自我更新及演替 |
| [6,8) | 亚健康 | 四级(较强) | 植被生长低于原生群落水平,群落结构相对稳定 | 生态系统轻微退化,退化程度不太严重,可在自然状态下自我恢复 |
| [4,6) | 不健康 | 三级(中等) | 植被生长状况一般,群落结构不稳定,有退化风险 | 生态系统部分退化,自我恢复困难,需要施加人工干预 |
| [2,4) | 警戒 | 二级(较弱) | 植被生长状况、群落稳定性较差,植被退化程度较为严重 | 生态系统退化较为严重,通过较长时期人工干预,可演替形成新的生态系统 |
| [0,2) | 崩溃 | 一级(很弱) | 植被生长状况、群落稳定性很差,植被退化程度非常严重 | 生态系统退化非常严重,需要通过长期不断的人工干预,逐步演替形成人工生态系统 |

3 结果与讨论

3.1 层次分析法确定指标权重

利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 建立工程扰动区植被恢复潜力研究的层次结构模型^[19],分为目标层(A),准则层(C、V、O、R)和指标层。评价因素集为: $A = \{C, V, O, R\}$; $C = \{C_1, C_2, C_3\}$; $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$; $O = \{O_1, O_2, O_3\}$; $R = \{R_1, R_2, R_3\}$ 。目标层是模型的最高层,即实现工程扰动区植被恢复潜力综合评价;准则层是保证总体目标实现的主要层次^[20],共有 4 个层级;指标层是最底层的结构层次,包括 13 个植被恢复潜力评价因子。

3.1.1 判断矩阵

综合分析基况评价指数(C)、活力评价指数(V)、组织力评价指数(O)、恢复力评价指数(R)4 个方面的评价指标对工程扰动区植被恢复的作

用^[21],通过专家打分法和问卷调查法,构成以下判断矩阵 A,表示植被恢复综合评价中 C、V、O、R 值的重要程度。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 4 & 3 \\ 1/2 & 1/5 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

经计算 $\lambda_{\max} = 4.132$,一致性指标 $CI = 0.0439$,一致性比例 $CR = 0.0489$ 。CI 越小,说明一致性越大; $CR < 0.1$,认定判断矩阵通过一致性检验。

由判断矩阵 A 可以得出各准则层权重向量为: $W = [0.2254, 0.5136, 0.1484, 0.1126]$,由各指标权重可见,活力评价指数和基况评价指数对植被恢复潜力研究的影响比较大。

各指标层在准则层中权重的判断矩阵分别为

C、V、O、R:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

经计算 $\lambda_{\max} = 3.011$, 一致性指标 $CI = 0.0046$, 一致性比例 $CR = 0.0079, CR < 0.1$ 。

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

经计算 $\lambda_{\max} = 4.060$, 一致性指标 $CI = 0.0201$, 一致性比例 $CR = 0.0224, CR < 0.1$ 。

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

经计算 $\lambda_{\max} = 3.005$, 一致性指标 $CI = 0.0019$, 一致性比例 $CR = 0.0034, CR < 0.1$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/2 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

经计算 $\lambda_{\max} = 3.053$, 一致性指标 $CI = 0.0267$, 一致性比例 $CR = 0.0461, CR < 0.1$ 。

3.1.2 权重计算

将各评价指标相对于准则层的权重与相对于目标层的权重相乘为二级权重, 计算每个指标在工程扰动区植被恢复潜力综合评价中所占的权重, 各指标权重见表 4。

表 4 植被恢复潜力评价指标权重
Table 4 Evaluation index weight of vegetation restoration potential

| 准则层 | 权重 | 指标层 | 权重 | 二级权重 | 排序 |
|-----|--------|----------------|--------|--------|----|
| C | 0.2254 | C ₁ | 0.5396 | 0.1216 | 3 |
| | | C ₂ | 0.2971 | 0.0670 | 6 |
| | | C ₃ | 0.1633 | 0.0368 | 10 |
| V | 0.5136 | V ₁ | 0.4415 | 0.2268 | 1 |
| | | V ₂ | 0.1104 | 0.0567 | 8 |
| | | V ₃ | 0.1856 | 0.0953 | 5 |
| | | V ₄ | 0.2625 | 0.1348 | 2 |
| O | 0.1484 | O ₁ | 0.6483 | 0.0962 | 4 |
| | | O ₂ | 0.2296 | 0.0341 | 11 |
| | | O ₃ | 0.1221 | 0.0181 | 12 |
| R | 0.1126 | R ₁ | 0.3324 | 0.0374 | 9 |
| | | R ₂ | 0.1397 | 0.0157 | 13 |
| | | R ₃ | 0.5279 | 0.0595 | 7 |

由表 4 可知, 准则层中权重最大的是活力评价指数 (V), 为 0.5136, 最小的是恢复力评价指数 (R), 为 0.1126; 在 13 个评价指标中, 二级权重最大的是植被恢复重要值 (V₁), 为 0.2268, 最小的是退化物种分盖度 (R₂), 为 0.0157。由此可见, 对工程扰动区植被恢复潜力评价影响最大的是活力评价指数, 影响最大的指标是植被恢复重要值, 这与张雄一等^[22]、易海杰等^[23] 研究结果一致, 进一步论证了上述判断矩阵的合理性。

3.2 评价结果

将不同扰动类型区的各项指标带入 CVOR 评价模型, 计算出各类型工程扰动区综合评价指数, 与植被及生态系统恢复潜力评价等级划分对照, 得出各区的植被恢复潜力和生态系统健康等级综合评价结果, 见表 5。由表 5 可知, 工程扰动区在竣工验收 6 年后, 生态环境得到相应的恢复, 从植被恢复潜力等级分析, Q1 区的 VOR 值最大, 植被恢复潜力最强, Q2 区的 VOR 值最小, 植被恢复潜力较弱, 植被恢复潜力由大到小依次为 Q1 区 > Q3 区 > Q4 区 > Q5 区 > Q2 区。

表 5 各区的植被恢复潜力和生态系统健康等级综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of vegetation restoration potential and ecosystem health level in each area

| 扰动类型区 | VOR 值 | CVOR 值 | 植被恢复潜力 | 生态系统健康等级 |
|-------|-------|--------|--------|----------|
| Q1 区 | 7.313 | 8.983 | 较强 | 健康 |
| Q2 区 | 3.961 | 4.996 | 较弱 | 不健康 |
| Q3 区 | 5.349 | 6.909 | 中等 | 亚健康 |
| Q4 区 | 4.656 | 5.875 | 中等 | 不健康 |
| Q5 区 | 4.215 | 5.360 | 中等 | 不健康 |

生态系统健康等级最高的是 Q1 区, CVOR 值为 8.983, 生态系统健康等级最低的是 Q2 区, 工程扰动区生态系统健康等级由高到低依次为 Q1 区 > Q3 区 > Q4 区 > Q5 区 > Q2 区, 生态系统健康等级与植被恢复潜力基本保持一致。

3.3 结果验证与分析

根据评价指标对评价结果的影响, 影响最大的为活力指数 (V) 和基况指数 (C), 对活力指数影响最大的是植物恢复重要值和均匀度, 对于基况评价指数影响最大的是土壤层厚度和地面坡度。

对不同工程扰动区植被恢复潜力进行分析:

(1)河道工程区(Q1区)。虽然该区域地面坡度较陡,但由于其是工程重点部分,对其工程投资较多,前期的施工管理和后期的植被生态修复投入较多,导致该区域植被恢复效果最好,物种丰富度和均匀度都是第一,故该区域植被恢复潜力最高。

(2)弃渣场区(Q3区)和取土区(Q4区)。这两个区域项目竣工验收后,在满足稳定和排水要求条件下,一直处于自然恢复状态,基本没有人为正向干扰,故该区域植被恢复潜力居中,比较符合植被生态修复现实规律。

(3)临时施工道路区(Q2区)和临时表土堆场区(Q5区)。这两个区域植被恢复潜力相对较弱,主要由于这两个区域在工程竣工验收后就对其复垦,大部分区域已经种植农作物,导致该区域物种丰富度指数相对较少,恢复物种分盖度值较小,进而影响植被恢复潜力和生态系统修复评价结果。

4 结论

(1)通过对不同工程扰动区植被恢复潜力综合评价,临时施工道路区植被恢复潜力较弱,河道工程区植被恢复潜力最强。

(2)植被恢复潜力与生态系统健康评价结果基本保持一致,表明植被恢复对于生态系统修复具有重大贡献。河道工程区生态健康等级为健康,属于容易恢复区;弃渣场区生态健康等级为亚健康,属于较易恢复区;取土区、临时施工道路区和临时表土堆场区生态健康等级为不健康,生态修复过程中须对这3个区域重点关注。

(3)通过对河道生态治理工程扰动区植被恢复情况取样调查与分析,验证了CVOR模型,其能够客观公正地对该工程扰动区植被恢复进行综合评价,可为后期相似工程扰动区植被恢复潜力预测提供参考。

[参考文献]

[1] 朱朋辉,潘保柱,李志威,等. 云南小江流域典型泥石流沟中底栖动物群落特征及其对河流地貌的响应[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 869-880.

[2] 王佟,杜斌,李聪聪,等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230-244.

[3] 李海东,秦卫华,张涛,等. 西藏高寒河谷流动沙地植被恢复潜力综合评价模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 220-228.

[4] 高海东,庞国伟,李占斌,等. 黄土高原植被恢复潜力研究

[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.

[5] 赵广举,穆兴民,田鹏,等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212.

[6] 杨鑫光. 高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D]. 西宁:青海大学, 2019.

[7] 孔维博,尹亚敏,彭尔瑞,等. 山区河流生态河道治理工程扰动区植被群落恢复的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 31-35.

[8] 孔维博,尹亚敏,彭尔瑞,等. 山区河道工程扰动边坡植物群落恢复动态研究[J]. 环境监测管理和技术, 2021, 33(6): 19-23.

[9] 武海峰. 晋西南地区天然气管道工程的水土保持措施及防治效果分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.

[10] 王飞,王永元,杨萌萌,等. 干旱河谷草本植物随海拔变化的物种多样性[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(4): 471-476.

[11] 温培才,盛茂银,王霖娇,等. 西南喀斯特高原盆地石漠化环境植物群落结构与物种多样性时空动态[J]. 广西植物, 2018, 38(1): 11-23.

[12] 于慧卿,史贵君,尹静,等. 基于全过程治水理念的城市水环境系统综合整治效果评价[J]. 环境监测管理和技术, 2021, 33(6): 64-67.

[13] 褚馨德,贾伟,张峻豪,等. 基于RSEI模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J]. 环境监测管理和技术, 2022, 34(1): 38-42.

[14] 任继周,南志标,郝敦元. 草业系统中的界面论[J]. 草业学报, 2000, 9(1): 1-8.

[15] 柳昆,彭建,彭芳乐. 地下空间资源开发利用适宜性评价模型[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 219-231.

[16] NAPITUPULU P, SURBAKTI A. Design of decision support system providing scholarship with analytical hierarchy process (AHP) method on Yayasan Seri Amal St. Ignatius Medan[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1114(1): 12089.

[17] KWAST-KOTLAREK U, HELDAK M. Evaluation of the construction and investment process of a high-pressure gas pipeline with use of the trenchless method and open excavation method. Analytic hierarchy process (AHP)[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 1-18.

[18] 陈英义,李道亮. 北方农牧交错带沙生源植被恢复潜力评价模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 130-134.

[19] 徐红玲,潘继征,徐力刚,等. 太湖流域湖荡湿地生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1279-1288.

[20] 赵冰琴,夏栋,夏露,等. 向家坝工程扰动区植被恢复土壤质量评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1224-1234.

[21] 田璐,邱思静,彭建,等. 基于PSR框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1682-1692.

[22] 张雄一,邵全琴,宁佳,等. 三北工程区植被恢复对土壤风蚀的影响及植被恢复潜力研究[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(11): 2153-2170.

[23] 易海杰,张晓萍,何亮,等. 黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 255-263.

本栏目编辑 谢咏梅