秦岭地区输电线路生态恢复效果评价及驱动因素识别

鱼小兵[1,2], 潘晓彤[1], 熊小刚[1], 卫 璐[1], 钱珂珂[1], 赵家明[3], 王 兵[3,4]

〔1.国网(西安)环保技术中心有限公司, 陕西 西安 710100; 2.国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 3.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所) 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院大学, 北京 100049〕

摘 要: [目的] 开展秦岭地区输电线路生态恢复效果评价及驱动因素识别研究,为该区输电线路的生态恢复工作提供科学参考。[方法] 选取秦岭地区不同恢复年限和电压等级的12条输电线路,通过实地调查塔基区域的植被群落特征与土壤性质,采用模糊综合评价法,系统地评价不同恢复年限和电压等级输变电线路塔基周边植被恢复状况,并基于地理探测器识别导致恢复效果存在差异的驱动因素。[结果] ①生态恢复效果随恢复年限增长而上升,恢复初期最低,恢复中期相比初期提高12.00%,恢复后期相比初期提高了18.32%; ②生态恢复效果随电压等级提升未呈现明显变化趋势; ③年均降水(q=0.347)、年均气温(q=0.313)和海拔(q=0.225)是显著(p<0.05)影响恢复效果的关键因素; ④恢复效果随保护区等级变化呈现"重点保护区>核心保护区>一般保护区"趋势。[结论] 气候与地形是影响恢复效果差异的关键因素,恢复年限为环境因素发挥作用提供条件,保护区等级与电压等级控制对恢复过程的干扰强度,但对最终恢复效果影响较弱。

关键词: 输电线路; 生态恢复; 模糊综合评价; 地理探测器; 秦岭地区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0169-09 **中图分类号:** X171.1

文献参数: 鱼小兵, 潘晓彤, 熊小刚, 等.秦岭地区输电线路生态恢复效果评价及驱动因素识别[J].水土保持通报,2026,46(5):169-177. Yu Xiaobing, Pan Xiaotong, Xiong Xiaogang, et al. Evaluation of ecological restoration effectiveness of power transmission lines in Qinling Mountains and identification of driving factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):169-177.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.033 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.033**

Evaluation of ecological restoration effectiveness of power transmission lines in Qinling Mountains and identification of driving factors

Yu Xiaobing[1,2], Pan Xiaotong[1], Xiong Xiaogang[1], Wei Lu[1], Qian Keke[1], Zhao Jiaming[3], Wang Bing[3,4]

〔1.*StateGrid (Xi''an) Environmental Protection Technique Center Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710100, *China*; 2.*Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710100, *China*; 3.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 4.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*〕

Abstract: [Objective] The effectiveness of ecological restoration along power transmission lines in the Qinling Mountains was evaluated, and its key driving factors were identified, in order to provide a scientific basis for ecological restoration of transmission lines in the region. [Methods] 12 power transmission lines with different restoration ages and voltage levels within the Qinling region were selected. Through field investigations of the vegetation community characteristics and soil properties in the tower foundation areas, a fuzzy comprehensive

收稿日期:2025-12-29 **修回日期:**2026-04-25 **采用日期:**2026-04-30

资助项目:"十四五"国家重点研发计划项目"秦巴山区退化生态系统修复与稳定性提升技术体系构建与示范"(2024YFF1306505); 国网陕西经济技术研究院"2025年电网项目建设对秦岭环境影响指标研究"(67号)

第一作者:鱼小兵(1980—),男(汉族),陕西省蒲城县人,主要从事电力工程环境影响评价。Email:fishyu1000@163.com。

通信作者:王兵(1982—),男(汉族),陕西省咸阳市人,博士,研究员,博士生导师,主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。Email:bwang@ms.iswc.ac.cn。

evaluation method was employed to systematically evaluate the vegetation restoration status around the tower foundations of power transmission lines across different restoration durations and voltage levels. Additionally, the GeoDetector was utilized to identify the driving factors responsible for differences in restoration effectiveness. [Results] ① The effectiveness of ecological restoration increased with longer restoration periods. It was lowest in the initial stage, improved by 12.00% in the middle stage compared to the initial stage, and further improved by 18.32% in the later stage. ② No significant trend was observed in ecological restoration effectiveness with increasing voltage levels. ③ Annual precipitation (q=0.347), annual average temperature (q=0.313) and altitude (q=0.225) were identified as significant key factors (p<0.05) influencing restoration effectiveness. ④ The restoration effectiveness exhibited a pattern of "key protected areas > core protected areas > general protected areas". [Conclusion] Climate and terrain are critical factors affecting differences in restoration effectiveness, while restoration duration provides conditions for the role of environmental factors. Protected area level and voltage level control the intensity of disturbances during the restoration process but have a relatively weak impact on final restoration effectiveness.

Keywords: power transmission line; ecological restoration; fuzzy comprehensive evaluation; GeoDetector; Qinling Mountains

生态恢复是指通过自然演替或人为干预,使退化、受损甚至被破坏的生态系统在结构、功能与服务等方面逐步恢复至健康、稳定、可持续状态的综合过程[1]。生态恢复评价一般包括指标体系的构建与评价方法的选取,常用的评价指标包括植被群落特征、植被结构功能、群落相似性与联结性,以及土壤理化性质和结构等[2-4],也有研究引入社会经济指标参与评价[5-6]。此外,部分研究基于"压力-状态-响应"(PSR)或"驱动力-压力-状态-影响-响应"(DPSIR)概念框架模型对指标进行重新分类[7],构建具有较强因果关系的评价指标体系。在构建上述评价指标体系的基础上,生态恢复评价多采用层次分析法、熵权法和TOPSIS法等[8-10]作为评价方法。以上研究有效评价了生态恢复的质量,但对于驱动因素交互作用的分析仍有待加强。此外,在基于实地调查获取数据的评价中,研究区内部分区域常因可达性及安全性等客观限制而难以开展数据采集,导致样点分布不均甚至存在空间空缺,从而影响评价结果的代表性与空间连续性。随着遥感与地理信息系统技术的广泛应用,基于遥感生态指数等方法的长时间序列动态监测成为热点[11-12],此类方法可在大范围进行连续评价,但评价精度取决于遥感数据的分辨率。

秦岭作为中国地理南北分界线,海拔较高、气候多变,生态环境极其脆弱[13]。大量跨区域输电线路不可避免地穿越秦岭地区[14],从而对秦岭脆弱的生态系统产生影响。当前输电线路与生态环境相关研究多集中在局地施工扰动对植物群落结构、生物多样性、土壤性质等产生的影响[9,15-17]。针对输电线路建设完成后的生态恢复问题,尚缺乏系统研究,尤其在生态恢复效果随年限和电压等级变化以及识别关键驱动因素方面。基于此,本研究以秦岭地区为研究区,选取包括50个塔基在内的12条输电线路作为研究对象,通过野外植被调查与室内土壤分析,结合遥感数据构建生态恢复评价指标体系,并运用地理探测器与机器学习方法识别恢复过程的关键驱动因素,系统评估输电线路施工后植被恢复效果对年限和电压等级的响应,研究结果可为秦岭地区输电线路的生态恢复提供参考。

1 研究区概况

研究区域为秦岭山脉的陕西段,位于东经105°30′—111°00′,北纬32°30′—34°30′,横跨陕西省中南部,海拔195~3 771 m,整体地势西高东低。气候随海拔变化呈现垂直分布特征,2 800 m以上区域年均气温2 ℃,年均降水不足1 000 mm,1 800~2 800 m区域年均气温2~10 ℃,年均降水800~1 000 mm,1 800 m以下区域年均气温10~16 ℃,年均降水600~900 mm[18]。植被呈现出明显的垂直地带性,常见植被类型包括高山草甸、针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林等[19]。土壤同样呈现出垂直地带性,常见土壤类型包括山地草甸土、暗棕壤、棕壤、黄棕壤、黄褐土和褐土[19-20]。

2 研究方法

2.1 线路选取与调查方法

本次调查于2025年8月进行,共调查塔基50处。选取电压均为330 kV的恢复1,2,4,8,16,23,33和53 a输电线路9条(恢复1 a塔基为在建线路的完工塔基,考虑塔基代表性,选择2条恢复1 a线路),调查塔基29个,用以研究输电线路恢复年限对生态质量的

影响。同时选取恢复年限较为接近的330 kV(与恢复4 a线路为同一条线路),500 kV,800 kV和1 100 kV线路4条,调查塔基21个,用以研究输电线路电压差异对生态质量的影响。对于每条输电线路,调查塔基覆盖《陕西省秦岭生态环境保护条例》一般保护区、重点保护区和核心保护区3种类型,同时兼顾秦岭主梁南北两侧以及不同海拔梯度,以保证调查的典型性和代表性(图1)。

调查塔基区域的恢复措施以表土回覆、撒播草籽为主。对于每个塔基区域,布设20 m×30 m样方,内部嵌套2个灌木样方(3 m×3 m)和2个草本样方(1 m×1 m)。在完成坡度、坡向等地形因子的记录后,对扰动区域植被盖度、植物种类、种数和株高等植被特征参数进行测量,并计算Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数等群落多样性指数,植被盖度采用垂直摄影法获取样方影像,每个样方重复拍摄3张,选取清晰度最高且无明显阴影的照片用于后续分析(表1)。同时测定土壤容重、黏结力、颗粒组成和有机质含量,并计算土壤可蚀性K。

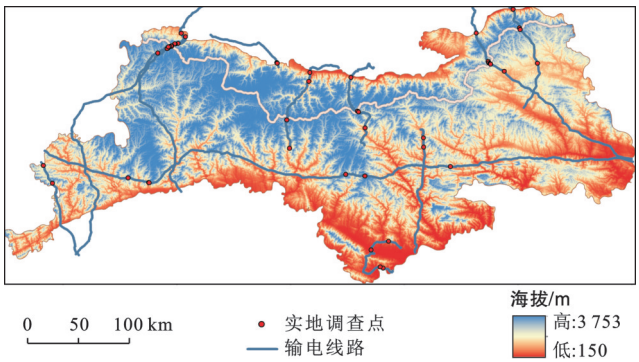


图1　研究区地形及调查输电线路、塔基分布

Fig.1　Topography of study area and distribution of surveyed transmission lines and tower foundations

2.2　生态恢复效果评价

2.2.1　评价指标体系构建

评价指标体系包括植被群落特征(B_1)、土壤性质(B_2)和植被生长特征(B_3)3个准则层13个指标(表2)。

表1　输电线路塔基立地条件及优势物种

Table 1　Site conditions and dominant species at transmission line tower foundations

编号	线路名称	高程/m	土壤质地	优势物种
1	±1100 kV吉泉线	377.50～2 431.79	砂土、砂质壤土、粉质壤土	野艾蒿、飞蓬、小蓬草
2	±800 kV青豫线	293.54～1 876.14	砂土、砂质壤土、粉质壤土、壤质砂土	小蓬草、麦冬
3	±800 kV哈密－重庆线	555.86～1 476.54	粉质壤土、粉土	狗尾草、藜、白茅
4	±500 kV德宝线	698.55～1 700.42	粉质壤土、粉土	薹草、木通、野艾蒿、牛膝
5	330 kV汉栖Ⅰ线/碛栖Ⅰ线	606.56～1 913.68	粉质壤土、粉土	野艾蒿、五节芒、麦冬、木贼
6	330 kV马汤线	715.31～1 117.78	粉土	黄栌、五节芒
7	330 kV骆黄Ⅰ,Ⅱ线	505.12～2 014.05	粉土	野艾蒿、蛇莓、披碱草、薹草
8	330 kV阳山Ⅰ,Ⅱ线	479.20～1 765.29	粉质壤土、粉土	薹草、野艾蒿、五节芒、野菊
9	330 kV金柞Ⅰ,Ⅱ线	266.09～1 179.80	粉质壤土、砂质壤土	麦冬、葎草、野艾蒿
10	330 kV罗张线	405.91～1 569.56	粉质壤土	野艾蒿、薹草
11	330 kV安月线	324.00～1 203.07	粉质壤土、粉土	野艾蒿、一年蓬
12	安康750 kV－月河330 kV线路	291.14～1 039.42	粉质壤土、粉土	薹草、白羊草、长芒草

注:野艾蒿(*Artemisia lavandulifolia*)、飞蓬(*Erigeron acris*)、小蓬草(*Erigeron canadensis*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、藜(*Chenopodium album*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、薹草(*Carex hirta*)、木通(*Akebia quinata*)、牛膝(*Achyranthes bidentata*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、木贼(*Equisetum hyemale*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、野菊(*Chrysanthemum indicum*)、葎草(*Humulus scandens*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)。

2.2.2　评价方法

评价方法采用模糊综合评价,作为一种基于模糊数学理论的多指标综合评价方法,适用于评价对象具有模糊性、不确定性或边界不清晰的复杂系统[21-22]。

采用最小-最大标准化(min-max normalization)进行数据归一化处理。指标层中Simpson指数、容重、土壤可蚀性和裸土指数为负向指标,其他为正向指标,使用最大值减去原始值的方式将负向指标正向化,所有指标均标准化至[0,1]范围内。以一致性比率(consistency ratio, CR)作为依据对判断矩阵进行检验,目标层及准则层CR依次为0.003 2,0.027 7,0.015 3和0.043 7,均小于0.1,一致性检验通过。使用综合赋权法进行指标赋权,层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)获得的权重依赖于专家经验,主观因素影响较大,熵权法(entropy weight

method，EWM）权重依赖于数据本身差异，避免人为因素的影响。然而，在生态评价中，部分指标的变化幅度较小，EWM会对该指标的重要性产生误判。为有效综合专家经验以及数据自身特征，通过距离函数判断两种权重的差异，从而动态地将主观权重以及客观权重进行综合，提高权重设置的科学性。

表2 生态评价指标分层

Table 2 Hierarchy of ecological evaluation indicators

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)
生态恢复质量评价	植被群落特征(B_1)	林下草本盖度(C_1)
		Margalef指数(C_2)
		Shannon Wiener指数(C_3)
		Simpson指数(C_4)
		Pielou指数(C_5)
	土壤性质(B_2)	黏结力(C_6)
		容重(C_7)
		有机质含量(C_8)
		土壤可蚀性(C_9)
	植被生长特征(B_3)	增强植被指数(EVI)(C_{10})
		裸土指数(BSI)(C_{11})
		归一化差异水分数据(NDMI)(C_{12})
		归一化差异红边指数(NDRE)(C_{13})

注：植被群落特征（C_1—C_5）通过野外调查获得，用以评价塔基建设扰动区群落物种丰富度和多样性等群落结构特征[23-24]。土壤性质（C_6—C_9）通过野外测定和室内分析获得，用以评价塔基建设扰动区土壤的物理结构、养分特征以及抗侵蚀能力[25]。植被生长特征（C_{10}—C_{13}）选用与野外调查同期的哨兵-2多光谱数据合成结果进行提取，用以评价塔基建设扰动区域植被生长状态、冠层的水分含量和叶绿素浓度等植被生理健康状况[26-29]。

使用AHP〔计算参考公式（1）〕和EWM〔计算参考公式（2）〕分别计算标准化后数据的主、客观权重。通过式（3）计算两种权重的差异并构建用于平衡主、客观权重的调节系数α，当差异过大时调节系数α趋近于0，综合权重偏向主观权重，反之则偏向客观权重，通过公式（4）计算获得综合权重。将综合权重与标准化数据进行加权求和，获得每座塔基的原始恢复得分，通过线性映射将原始得分映射至[60，100]区间，数值越高代表恢复效果越好。采用等间距法划分评价得分为Ⅳ级（[60，70)）、Ⅲ级（[70，80)）、Ⅱ级（[80，90)）和Ⅰ级（[90，100]）共4级，相比自然间断法等方法等间距法不受样本分布不均的影响，划分结果更具有可比性。

$$\omega_j^{\mathrm{AHP}}=\frac{\omega_{c(i)}^{crit}\omega_{j|c(j)}^{ind}}{\sum_{i=1}^{m}\omega_{c(i)}^{crit}\omega_{i|c(i)}^{ind}} \tag{1}$$

$$\omega_j^{\mathrm{EWM}}=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \tag{2}$$

$$\alpha=1-\frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(\omega_j^{\mathrm{EWM}}-\omega_j^{\mathrm{AHP}}\right)^2}}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

$$\omega_j^{\mathrm{combined}}=(1-\alpha)\omega_j^{\mathrm{AHP}}+\alpha\omega_j^{\mathrm{EWM}} \tag{4}$$

式中：ω^{crit}，ω^{ind}分别为准则层与指标层的权重，通过构造判断矩阵$\boldsymbol{A}_w=\lambda_{\max}\omega$求解获得；$e_j$为熵值。

2.3 基于地理探测器的主导因素分析

地理探测器是一种用于分析地理现象空间分异性及其驱动因素的统计方法[30]，可以分析生态评分受到地形等因素的影响程度，并探究各因素间的交互作用，从而对生态评分呈现的特点进行解释。获取各塔基的地形（海拔、坡度和坡向）和气候（年均降水、年均气温）数据（表3）作为地理探测器输入的变量。

表3 地理探测器数据来源

Table 3 Data sources of GeoDetector

数据	来源	时间
年均降水	CHIRPS	2001—2020年平均
年均气温	ERA5 Land	2001—2020年平均
海拔、坡度、坡向	SRTM GL1	2000年

基于梯度提升决策树（gradient boosting decision tree，GBDT）算法对评价结果以及地理探测器的主导因素数据进行分析，从而对整体线路进行评价。由于训练数据量较少，为避免过拟合现象，需要对模型复杂度进行控制，因此设置最大深度为2，最大学习率为0.01，并引入正则化处理以及子采样操作，最终以20次的5折交叉验证进行模型评价。

3 结果与分析

3.1 不同年限输电线路塔基生态恢复状况

塔基扰动区域恢复效果随恢复年限增加呈现上升趋势，其中1～4 a波动变化，8～23 a相较于1～4 a有明显上升，33～53 a缓慢上升（图2）。植被群落特征表现为1～4 a最低（平均76.64），8～23 a较高（平均84.53），33～53 a最高（平均88.70）；土壤性质表现为1～4 a最低（平均76.49），8～23 a（平均81.92）和33～53 a（平均79.69）差异较小，但相较于1～4 a更高；植被生长特征与植被群落特征变化一致，表现为1～4 a最低（平均77.63），其次为8～23 a（平均82.31），33～53 a最高（平均88.09）；综合评价结果变化趋势相同，

1～4 a最低(平均72.58),8～23 a较高(平均80.98),33～53 a最高(85.88)。

3.2　不同电压输电线路塔基生态恢复状况

塔基扰动区域恢复效果随电压等级增加无明显变化趋势,330 kV线路相比其他线路较低,其他线路差异不明显(图3)。植被群落特征表现为330 kV线路(平均70.79)低于500 kV,800 kV和1 100 kV线路(平均83.86,83.94,93.90),500 kV及以上线路差异较小;土壤性质表现为波动变化,各电压等级差异较小;植被生长特征表现为上升趋势,330 kV线路最低(平均69.05),500 kV(平均81.20),800 kV(平均84.73)和1 100 kV(平均87.50)依次缓慢上升;综合评价结果变化与植被群落特征变化趋势类似,同样表现为330 kV线路最低(平均69.05),500 kV以上线路恢复效果评分平均值缓慢上升,四分位距重叠度较高,500 kV以上线路恢复效果无显著差异。

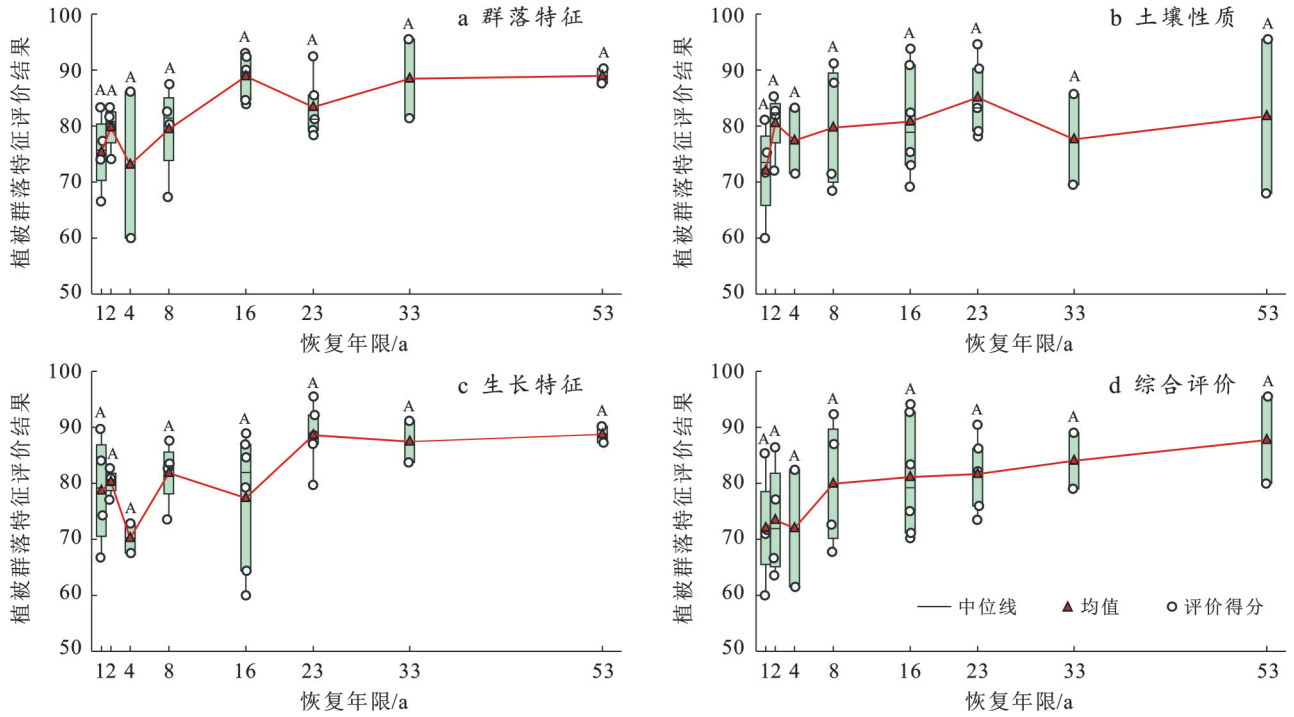


图2　不同恢复年限输电线路塔基生态恢复效果

Fig.2　Ecological restoration effectiveness of transmission line tower foundations under different restoration durations

3.3　基于地理探测器的生态恢复效果影响因素分析

将所有影响因素划分为驱动因子和植被恢复影响因子2类。驱动因子包含保护区等级、电压等级和恢复年限,植被恢复影响因子包含地形因子(坡向、坡度、海拔和主梁南北)和气候因子(年均降水和年均气温)。q因子排序依次(表4)为年均降水、年均气温、坡向、海拔、恢复年限、保护区等级、主梁南北、电压等级、坡度。年均降水(q=0.347)、年均气温(q=0.313)和海拔(q=0.225)3个指标的解释力最强,且作用显著(p<0.05)。其他因子虽然在统计学上不显著,但其q因子仍具有一定解释力。气候因子与其他因子均表现出非线性增强或双因子增强效应,水热条件与地形综合作用主导了塔基的生态恢复效果。恢复年限虽然单因子解释力弱(q=0.204),但与其他因子交互后其解释力增加(恢复年限∩年均气温=0.543,恢复年限∩年均降水=0.586,恢复年限∩海拔=0.575,恢复年限∩坡向=0.572,恢复年限∩主梁南北=0.667)。保护区等级和电压等级与其他因子交互效应虽呈现非线性增强以及双因子增强,但其解释力低于其他环境因子组合,表明在植被恢复过程中,人为因素具有一定调控作用,但自然因素才是主导(图4)。

表4　各影响因子解释力(q)与显著性(p)

Table 4　Explanatory power (q) and significance (p) of different influencing factors

项目	保护区等级	电压等级	恢复年限	坡向	坡度	海拔	主梁南北	年均降水	年均气温
q	0.193	0.106	0.204	0.277	0.103	0.225	0.193	0.347	0.313
p	0.260	0.505	0.975	0.479	0.691	0.037	0.344	0.041	0.000

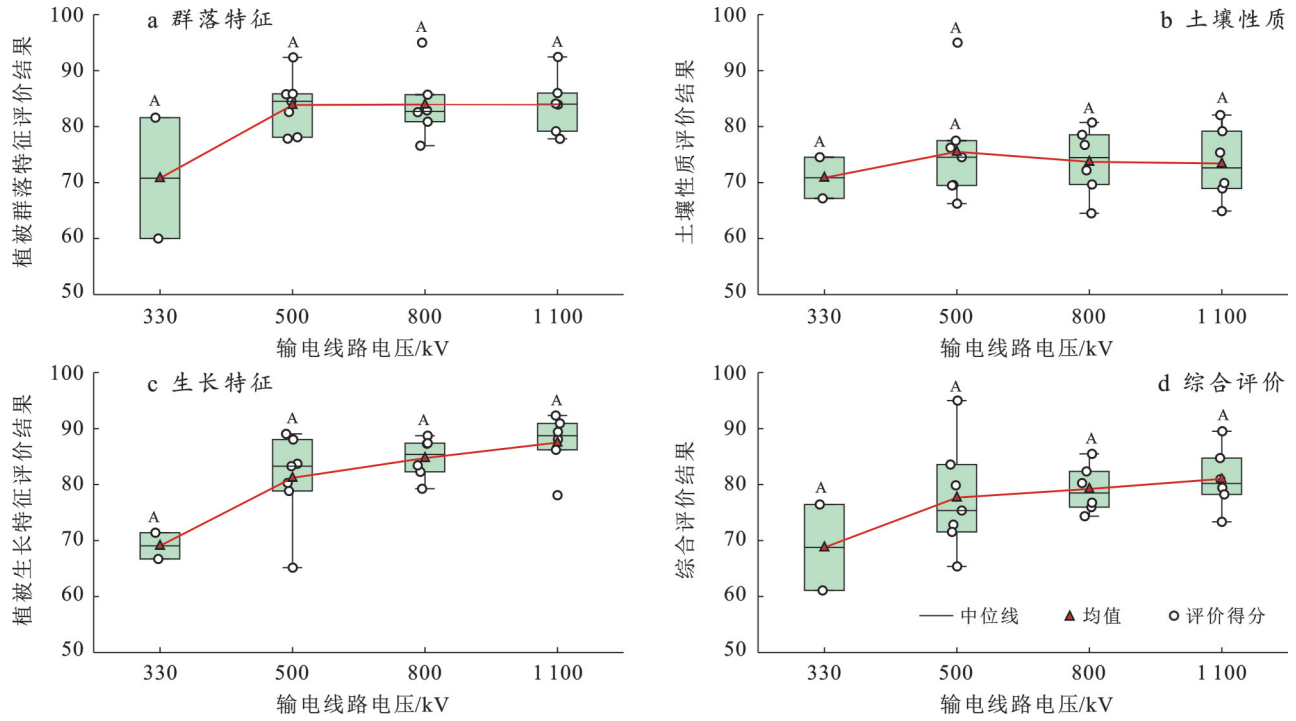


图 3 不同电压等级输电线路塔基生态恢复效果

Fig.3 Ecological restoration effectiveness of transmission line tower foundations under different voltage levels

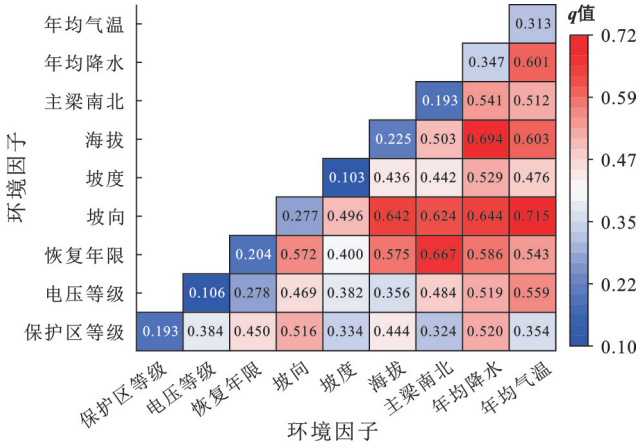


图 4 生态恢复效果驱动因子交互作用结果

Fig.4 Interaction detection results of driving factors affecting ecological restoration effectiveness

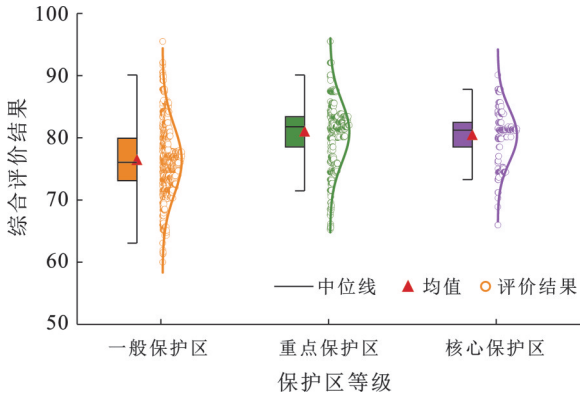


图 5 不同保护区等级的生态恢复效果

Fig.5 Ecological restoration effectiveness under different levels of protected areas

3.4 不同保护区等级输电线路塔基生态恢复状况

使用 SPSS 对 q 因子最高且统计学显著的 3 个环境因素（海拔、年均气温和年均降水）进行共线性分析（图 5），VIF 依次为 3.294，1.159 和 3.137，结果表明无显著共线性。对 GBDT 算法进行训练，得出最佳模型（验证集 RMSE=7.085，R^2=0.474）。利用线路各塔基的地形和气候数据，对秦岭区域全部塔基进行评价，最终结果表明，大多数塔基的评价结果处于“Ⅱ级”与“Ⅲ级”水平，而“Ⅰ级”和“Ⅳ级”所占比例较低。塔基恢复效果评分随保护区等级增高呈现上升趋势，一般保护区最低（平均 76.36），其次是核心保护区（平均 80.38），重点保护区最高（平均 80.93）。

4 讨 论

生态恢复效果随恢复年限增长而提高，从恢复初期（1～4 a）的 72.58 上升至恢复中期（8～23 a）的 80.98，最终达到恢复后期（33～53 a）的 85.88。恢复初期，工程建设对地表植被与土壤结构破坏严重，而恢复措施的作用也尚未完全体现。此时，群落演替处于初级阶段，植被群落与植被健康状况较差，导致生态恢复效果不理想，符合退化山地生态系统的特征[31-32]。在恢复中期，随着植被重建、枯落物覆盖或混入土壤，土壤养分含量有所提升，为更多物种的共存提供了环境基础，群落及植被特征评分上升。到达恢复后期时，群落结构趋于稳定，各项评分接近自

然生态系统水平。

恢复效果随电压等级的增加未呈现明显变化趋势。理论上较高电压等级输电线路塔基尺寸及安全距离要求更大,占地面积及施工扰动范围相应增加,恢复效果因此降低。然而研究结果并未表现出恢复效果随电压等级升高而降低的规律,这表明电压等级并非决定恢复成效的主导因素。其原因在于不同电压等级塔基的施工工艺不同,高电压等级塔基根开(塔基相邻两基础间距离)较大,施工扰动主要集中于单个基础周边,塔基之间扰动区域相互独立,整体扰动较分散,低电压等级线路塔基根开相对较小,扰动区域叠加程度更高,因此扰动强度更大。其次,土壤差异主要受区域立地条件、母质类型、气候及植被恢复措施等环境与管理因素的驱动[33],不同电压等级线路所处区域的生态管控强度与自然条件存在差异,这也是影响恢复效果的重要原因,330 kV线路大量塔基位于一般保护区,人为扰动活跃、评分最低,500 kV以上线路穿越一般保护区、重点保护区和核心保护区,对人为扰动的管理严格,因此评分更高;此外,800 kV全线位于秦岭主梁以南,水热条件更优越,恢复效果差异较小(79.20±3.88),而500 kV和1 100 kV线路南北纵穿主梁,水热条件多样,恢复效果差异较大(77.65±8.93,81.03±5.09)。

地理探测器单因子探测结果显示,年均降水(q=0.347)、年均温度(q=0.313)和海拔(q=0.225)是解释恢复效果空间分异的关键因素,已有植被恢复研究中也有类似结果[27,34],生态系统对水分极为敏感,降水通过调控土壤湿度和养分循环等影响植被恢复,温度则调控植物物候、光合作用效率及物种分布,海拔影响温度和降水的垂直梯度。从单因子关系来看,降水和温度对生态恢复具有促进作用(y=0.002x+77.28, R^2=0.008; y=1.31x+56.41, R^2=0.15),海拔则表现为抑制作用(y=-0.004x+83.64, R^2=0.04)。尽管上述单因子分析反映了一定趋势,但较差的拟合效果表明生态恢复并非由单一环境因子决定,而是多种因素共同作用的结果,单变量关系难以充分揭示其内在规律。值得注意的是,尽管恢复年限的单因子解释力较弱(q=0.204),但其与其他因子的交互作用呈现出显著的非线性增强效应,恢复年限与年均降水(q=0.586)、年均温度(q=0.543)、海拔(q=0.575)及坡向(q=0.572)的交互作用解释力远超各因子独立作用之和,这表明生态恢复并非简单的时间累积过程,而是高度依赖于特定的环境背景[35-36]。在水热条件优越、地形适宜的地区,随着时间的推移,植被恢复潜力得以充分释放;而在高海拔地区,即使恢复时间较长,植被恢复仍可能受限。因此,恢复效果本质上是时间与环境因素协同作用的结果。虽然保护区等级、电压等级与其他因子之间存在增强的交互效应,但其影响仍弱于自然因子组合的作用。这表明人为干预(无论是保护性封禁还是工程扰动)主要通过调节局部干扰强度来影响恢复过程,难以根本改变由气候与地形决定的生态潜力上限[36]。

恢复效果随保护区等级变化呈现“重点保护区>核心保护区>一般保护区”的现象,印证了以上结论。一般保护区因低海拔优势,水分和热量条件好,但由于管理宽松、人为扰动较多等原因导致部分塔基评分较低,因此生态恢复效果呈现总体偏低,差异较大的现象;重点保护区水热条件相比一般保护区较差,但仍优于高海拔的核心保护区,因此即使保护力度不如核心保护区,恢复效果却优于核心保护区;核心保护区范围为海拔2 000 m以上区域,以及秦岭主梁两侧各1 000 m以内,主要支脉两侧各500 m以内的区域,整体海拔较高,水热条件受限,水热条件方面表现出“一般保护区>重点保护区>核心保护区”规律。而人类活动管控强度表现为“核心保护区>重点保护区>一般保护区”规律,因此研究区恢复效果呈现“重点保护区>核心保护区>一般保护区”现象。

5　结　论

(1)生态系统的恢复过程随时间逐步改善,植被恢复呈阶段性演替,在恢复初期较差,中期缓慢上升,后期到达顶峰并趋于稳定,恢复效果依赖恢复时间与环境因素的交互作用,不仅是时间累积的结果,还需适宜的环境条件支持。

(2)电压等级增大,生态恢复效果无明显变化趋势,电压并非导致评分差异的主导因素。

(3)恢复效果随保护区等级提升而上升,降水、温度和海拔是解释生态恢复效果差异的主导因子,保护区等级和电压等级虽然可以控制干扰强度,但生态恢复效果主要取决于气候与地形等自然因素。

参考文献(References)

[1] 吴丹丹,蔡运龙.中国生态恢复效果评价研究综述[J].地理科学进展,2009,28(4):622-628.
Wu Dandan, Cai Yunlong.Evaluation of ecological restoration effects in China: A review [J]. Progress in Geography, 2009,28(4):622-628.

[2] 郭成久,孙雨桐,李海福,等.抚顺西露天矿生态恢复区土壤养分评价[J].沈阳农业大学学报,2020,51(2):137-145.

Guo Chengjiu, Sun Yutong, Li Haifu, et al. Soil nutrients assessment of ecological restoration zone of west open pit of Fushun mine [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020,51(2):137-145.

[3] 郝婧,郭东罡,上官铁梁,等.煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价[J].生态学报,2016,36(7):1946-1958.
Hao Jing, Guo Donggang, Shangguan Tieliang, et al. Ecological performance assessment on early plant reclamation in coal gangue yard [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(7):1946-1958.

[4] 赵玲慧,王文颖,李文龙,等.三江源区高寒草地生态恢复措施及效果评价[J].青海师范大学学报(自然科学版),2024,40(3):1-13.
Zhao Linghui, Wang Wenying, Li Wenlong, et al. Ecological protection, restoration construction measures and effect evaluation of alpine grassland in headwater regions of three rivers in China [J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2024,40(3):1-13.

[5] 侯彩霞,祝永芳.基于SES-PSR模型的沙漠化逆转区社会-生态系统恢复力评价和预测:以宁夏盐池县为例[J].中国沙漠,2024,44(6):277-286.
Hou Caixia, Zhu Yongfang. Social-ecological system resilience assessment of desertification reversal area based on SES-PSR model: A case study of Yanchi, Ningxia, China [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(6):277-286.

[6] 华倩宇,陆雍容,周志平,等.基于PSR模型的海岛水利水电工程生态环境效应综合评价体系研究[J].水电能源科学,2025,43(7):57-60.
Hua Qianyu, Lu Yongrong, Zhou Zhiping, et al. Research on comprehensive evaluation system of ecological environmental effects for island water conservancy and hydropower projects based on the PSR model [J]. Water Resources and Power, 2025,43(7):57-60.

[7] 王兵,刘国彬,张光辉,等.基于DPSIR概念模型的黄土丘陵区退耕还林(草)生态环境效应评估[J].水利学报,2013,44(2):143-153.
Wang Bing, Liu Guobin, Zhang Guanghui, et al. Evaluating eco-environmental effects of "grain for green" project based on DPSIR framework in the loess hilly region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 143-153.

[8] 陈秋帆,卢琦,王妍.基于熵权法TOPSIS模型综合评价石漠化区4种苔藓植物的生态修复效益[J].水土保持研究,2023,30(3):195-202.
Chen Qiufan, Lu Qi, Wang Yan. Evaluation on the ecological restoration benefits of four bryophytes in rocky desertification area based on entropy weight TOPSIS model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):195-202.

[9] 毛西吟,施东风,申屠津,等.基于AHP与模糊分析的输电线路生态环境修复评价研究[J].环境科学与管理,2024,49(12):186-190.
Mao Xiyin, Shi Dongfeng, Shentu Jin, et al. Research on ecological environment restoration evaluation of transmission lines based on AHP and fuzzy analysis [J]. Environmental Science and Management, 2024, 49(12): 186-190.

[10] 魏生云,王建国,巨克平,等.AHP-模糊综合评价法在茶马沟矿山地质及生态环境修复治理中的应用与实践[J].有色金属(矿山部分),2023,75(6):106-115.
Wei Shengyun, Wang Jianguo, Ju Keping, et al. Application and practice of AHP-fuzzy comprehensive evaluation method in geological and ecological environment restoration of Chamagou mine [J]. Nonferrous Metals (Mine Section),2023,75(6):106-115.

[11] 韩沙鸥,周鑫,杨存建.基于RSEI的九寨沟地震区生态环境质量恢复评价[J].地理空间信息,2025,23(5):84-89.
Han Shaou, Zhou Xin, Yang Cunjian. Eco-environmental quality restoration evaluation of Jiuzhaigou earthquake area based on RSEI [J]. Geospatial Information, 2025, 23(5):84-89.

[12] 赵晓涛,陶汪海.基于RSEI指数的泾惠渠灌区生态环境质量变化评价[J].中国农村水利水电,2023(1):24-30.
Zhao Xiaotao, Tao Wanghai. Evaluation of ecological quality change in Jinghui canal irrigation district based on RSEI index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(1):24-30.

[13] 吴磊,刘康.陕西秦岭山地生态脆弱性评价[J].地下水,2011,33(4):171-173.
Wu Lei, Liu Kang. Assessment of ecological vulnerability in Qinling Mountains of Shaanxi [J]. Ground Water, 2011,33(4):171-173.

[14] 孔志战,李新民.以保护秦岭生态环境为导向的输电线路建设与运维管理体系建设[J].企业管理,2022(S1):168-169.
Kong Zhizhan, Li Xinmin. Construction of transmission line and operation and maintenance management system oriented to protect Qinling ecological environment [J]. Enterprise Management, 2022(S1):168-169.

[15] 陈菲儿.输电线路建设对生态保护红线的影响研究:以大同-天津南特高压交流输电工程(山西段)为例[J].山西林业,2025(S2):80-81.
Chen Feier. Study on the impact of transmission line construction on ecological protection red line: Taking Datong-Tianjinnan UHV AC transmission project

(Shanxi section) as an example [J]. Forestry of Shanxi, 2025(S2):80-81.

[16] 丛博.石板峪220千伏输变电工程环境影响评价研究[D].北京:华北电力大学, 2015.
Cong Bo. Research on the environment impact assessment of the power transmission project on the Shiban valley [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[17] 张寿强.高压输电线路工程的环境影响分析[J].电子技术,2021,50(11):266-267.
Zhang Shouqiang. Analysis of environmental impact of high voltage transmission line project [J]. Electronic Technology, 2021,50(11):266-267.

[18] 赵婷,白红英,李九全,等.气候变暖背景下秦岭陕西段植被潜在分布区格局变化[J].生态学报,2023,43(5):1843-1852.
Zhao Ting, Bai Hongying, Li Jiuquan, et al. Changes of vegetation potential distribution pattern in the Qinling Mountains in Shaanxi Province in the context of climate warming [J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(5):1843-1852.

[19] 申艳军,陈兴,彭建兵,等.秦岭生态地质环境系统本底特征及研究体系初步构想[J].地球科学,2024,49(6):2103-2119.
Shen Yanjun, Chen Xing, Peng Jianbing, et al. Background characteristics of ecological geological environment system in Qinling Mountains and assumption of its theoretical system [J]. Earth Science, 2024, 49(6):2103-2119.

[20] 常庆瑞,雷梅,冯立孝,等.秦岭北坡土壤发生特性与系统分类[J].土壤学报,2002,39(2):227-235.
Chang Qingrui, Lei Mei, Feng Lixiao, et al. Genetic characteristics and taxonomy of soils on the northern slope of the Qinling Mountain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(2):227-235.

[21] 陈衍泰,陈国宏,李美娟.综合评价方法分类及研究进展[J].管理科学学报,2004,7(2):69-79.
Chen Yantai, Chen Guohong, Li Meijuan. Classification & research advancement of comprehensive evaluation methods [J]. Journal of Management Sciences in China, 2004,7(2):69-79.

[22] 李笑梅.多指标综合评价方法综述[J].统计与管理,2022,37(2):45-48.
Li Xiaomei. Summary of multi-index comprehensive evaluation methods [J]. Statistics and Management, 2022,37(2):45-48.

[23] 吴芳芳,刘娜,何春梅,等.秦岭山地木本植物群落结构及多样性的海拔梯度格局[J].生物多样性,2024,32(12):3-21.
Wu Fangfang, Liu Na, He Chunmei, et al. Elevational gradient pattern of woody plant community structure and diversity in the Qinling Mountains [J]. Biodiversity Science,2024,32(12):3-21.

[24] 杨志汝,张建鹏.秦岭太白山巴山冷杉天然林群落物种多样性[J].西北林学院学报,2023,38(2):140-146.
Yang Zhiru, Zhang Jianpeng. Species diversity of abies fargesii natural forest community in Mt. Taibai of Qinling [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023,38(2):140-146.

[25] 卫玮,党坤良.秦岭南坡林地土壤有机碳密度空间分异特征[J].林业科学,2019,55(5): 11-19.
Wei Wei, Dang Kunliang. Spatial variation of the density of soil organic carbon in forest land on the southern slope of Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,55(5):11-19.

[26] 方灿莹,王琳,徐涵秋.不同植被红边指数在城市草地健康判别中的对比研究[J].地球信息科学学报,2017,19(10):1382-1392.
Fang Canying, Wang Lin, Xu Hanqiu. A comparative study of different red edge indices for remote sensing detection of urban grassland health status [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017,19(10):1382-1392.

[27] 徐伟恒,熊源,黄邵东,等.遥感在生态环境质量监测与评价中的应用现状研究[J].西南林业大学学报,2023,43(3):195-204.
Xu Weiheng, Xiong Yuan, Huang Shaodong, et al. Review and research progress of the application of remote sensing in ecological environment quality monitoring and evaluation [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2023,43(3):195-204.

[28] 杨辰,沈润平.森林扰动遥感监测研究进展[J].国土资源遥感,2015,27(1):1-8.
Yang Chen, Shen Runping. Progress in the study of forest disturbance by remote sensing [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015,27(1):1-8.

[29] 朱林富,杨华,谢世友,等.基于MODIS-EVI的四川植被覆盖度空间分布影响因子探测[J].环境监测管理与技术,2025,37(1):42-49.
Zhu Linfu, Yang Hua, Xie Shiyou, et al. Influence factors on spatial distribution of vegetation coverage in Sichuan based on MODIS-EVI [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2025,37(1):42-49.

[30] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. GeoDetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

(下转第200页)