

白 骅, 曾 琳, 李佳佳, 等. 秦岭山区高速公路施工路域生态影响关键要素分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(3): 128-140.
BAI Hua, ZENG Lin, LI Jia-jia, et al. Analysis of key ecological impact factors in construction area of expressways in Qinling Mountains [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(3): 128-140.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.03.011

秦岭山区高速公路施工路域生态 影响关键要素分析

白 骅¹, 曾 琳¹, 李佳佳¹, 刘亚蕾²

(1. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安经济技术开发区管理委员会
泾渭新城发展建设管理中心规划建设部, 陕西 西安 710018)

摘 要: 针对山区高速公路施工建设对沿线路域生态产生一定负面影响, 但缺乏对影响关键要素深入研究的状况, 聚焦秦岭山区高速公路线性建设工程生态扰动机制, 探究秦岭山区高速公路施工路域生态影响关键要素。立足于已有相关研究成果, 结合秦岭山区高速公路施工工程与路域生态特征特点, 梳理秦岭山区高速公路施工期间对沿线路域生态的影响机理, 选取具有典型性、代表性的评价指标, 因地制宜构建多层次、多维度的秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系。运用生态等效对照原理, 选取 8 条生态本底相似的秦岭山区高速公路开展实证分析, 利用主成分分析 (PCA) 法实现多维指标降维处理, 提取出 1 个主成分, 并计算各项评价指标的权重及各条高速公路的综合得分。根据评价结果, 提出针对秦岭山区高速公路沿线路域的差异化修欠建议。研究表明: 秦岭山区高速公路沿线施工路域生态最易受到林草植被损失、挖填方平衡以及桥梁、隧道比率的影响; 较易受到永久占用非建设用地面积占比、农业植被损失、新增水土流失量以及临时用地生态恢复的影响, 除此之外, 植被恢复、绿化覆盖、水土流失治理程度等也对路域生态产生一定影响。

关键词: 道路工程; 路域生态; 主成分分析; 工程景观; 高速公路工程

中图分类号: U411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2025)03-0128-13

Analysis of key ecological impact factors in construction area of expressways in Qinling Mountains

BAI Hua¹, ZENG Lin¹, LI Jia-jia¹, LIU Ya-lei²

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Planning and
Construction Department, Development and Construction Management Center of Jingwei
New City, Xi'an Economic and Technological Development Zone Management
Committee, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: In response to the certain negative impacts of the construction of expressways in mountainous areas on the ecological environment along the routes, but the lack of in-depth research on the key influencing factors, this study focused on the ecological disturbance

收稿日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72541007)

作者简介: 白 骅 (1978-), 男, 陕西岐山人, 教授, 工学博士, E-mail: bai029@126.com。

通信作者: 刘亚蕾 (1998-), 女, 山东巨野人, 助理工程师, E-mail: 1193196019@qq.com。

mechanism of the linear construction projects of expressways in the Qinling Mountains and explored the key factors affecting the ecological environment along the construction routes of expressways in the Qinling Mountains. Firstly, based on the existing relevant research results, combined with the characteristics of the construction projects and the ecological environment along the routes of expressways in the Qinling Mountains, the mechanism of the impact of the construction of expressways in the Qinling Mountains on the ecological environment along the routes was sorted out. Typical and representative evaluation indicators were selected, and a multi-level and multi-dimensional evaluation index system for the ecological impact of the construction of expressways in the Qinling Mountains was constructed in accordance with local conditions. Secondly, the ecological equivalent control principle was applied, and eight expressways with similar ecological backgrounds in the Qinling Mountains were selected for empirical analysis. The principal component analysis (PCA) method was used to reduce the dimensions of multiple indicators, extracting one principal component and calculating the weight of each evaluation indicator and the comprehensive score of each expressway. Finally, based on the evaluation results, differentiated restoration suggestions for the ecological environment along the routes of expressways in the Qinling Mountains were proposed. The research results show that the ecological environment along the construction routes of expressways in the Qinling Mountains is most susceptible to the loss of forest and grass vegetation, the balance of excavation and filling, and the ratio of bridges and tunnels. It is also relatively susceptible to the proportion of permanent occupation of non-construction land, the loss of agricultural vegetation, the increase in soil erosion, and the ecological restoration of temporary land use. In addition, vegetation restoration, green coverage, and the degree of soil erosion control also have certain impacts on the ecological environment along the routes. 7 tabs, 6 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; road area ecology; principal component analysis; engineering landscape; highway engineering

0 引 言

山区高速公路具有延伸距离长、施工举措多样、施工周期较长等特点。目前,山区高速公路施工期间各类工程举措对沿线路域生态环境产生了一定程度的负面影响^[1]。在路基工程、桥涵工程、隧道工程及其他临时公路工程的实施过程中,公路沿线路域出现场地占用、机械碾压以及人员活动,使得公路沿线路域的地形地貌、自然景观、水文过程等发生变化,影响各类林地及农田,造成条型裸露土地、土壤结构板结,从而进一步影响植被生长发育和生态系统结构功能,植被覆盖区域面积减少,物种多样性下降,植被枯萎,加剧水土流失^[2-3]。在生态文明建设的要求下,如何促进山区高速公路建设与路域生态环境保护与修复之间的和谐共融,协调人地关系,是山区高速公路建设所面临的新机遇与新挑战^[4]。

目前,已有相关研究成果主要集中在公路施工工程^[5-7]对生态环境^[8-10]、景观效应^[11-13]等方面的影响研究。公路施工工程对生态环境的影响研究主要包含公路施工工程对动植物资源^[14-16]、土壤资源^[17-19]、水资源^[20-21]、大气资源^[22-24]等单一生态因子或综合性影响的研究;对景观效应的影响研究主要包含对公路绿化效果^[25-27]、公路绿化工程技术^[28-32]、公路景观设计与提升^[33-34]等内容的研究。已有研究表明,公路施工期对于路域生态环境的影响最大^[35-36],公路施工工程包含公路施工主体工程与整体绿化工程,各项工程举措对路域生态的影响方式与程度不同^[37-39]。以往研究主要从宏观角度分析公路施工工程整体对路域生态的影响,缺少从工程景观角度剖析公路施工工程各项举措所产生的影响,识别高速公路施工工程对路域生态影响的关键要素。

秦岭山区是中国重要的生态屏障,山脉南北交错,地形险峻复杂,气候条件适宜,水资源丰富,

形成了众多的河流和湖泊,土壤类型多样,土壤质地相对较好,植被种类繁多,分布广泛,生物多样性丰富是金丝猴、大熊猫等珍惜濒危野生动植物的栖息地。同时,秦岭山区也是中国典型的生态敏感脆弱区^[40-41],生态系统能量循环和物质转换较为缓慢,生态环境一旦遭受施工破坏,较长时间内无法自行恢复。因此,秦岭山区高速公路施工建设客观上要求施工建设过程中应最大程度保护沿线路域生态环境^[42]。识别出秦岭山区高速公路施工过程中对路域生态产生影响的关键要素,以期在山区高速公路施工前进行各项施工工艺优化,改进施工举措,在山区高速公路施工后为构建良好长效的生态基底提供决策依据,更具针对性地减轻山区高速公路施工工程对沿线路域生态环境产生的不良影响,同时对其他类似生态敏感山区公路施工建设项目的科学决策、实施和管理提供借鉴参考。

1 研究区域

选取高速公路主线项目区位于秦岭山地南麓,跨越秦巴山地落叶阔叶、常绿阔叶混交林生态区,沿线地貌类型主要为中高山、中山、低山和河谷阶地等地貌,沿线分布长江水系,土地利用类型主要以林地、灌木林地、荒草地、建设用地耕地及水体为主,植被类型以针叶林、阔叶林、灌丛、草甸和农业植被为主,属亚热带季风山地气候,路域自然环境大致相同,具有典型性及区域代表性的 8 条高速公路。选取宁陕至石泉高速公路(Y_1)、银百线陕西境安康至岚皋高速公路(Y_2)、定汉线宝鸡至坪坎高速公路(Y_3)、古镇线西乡至镇巴高速公路(Y_4)、定汉线坪坎至汉中(石门)高速公路(Y_5)、安来线平利至镇坪高速公路(Y_6)、十天线汉中至略阳高速公路(Y_7)、眉县至太白县高速公路(Y_8),以降低由于路域自然环境差异导致的结果偏差,如图 1 所示。

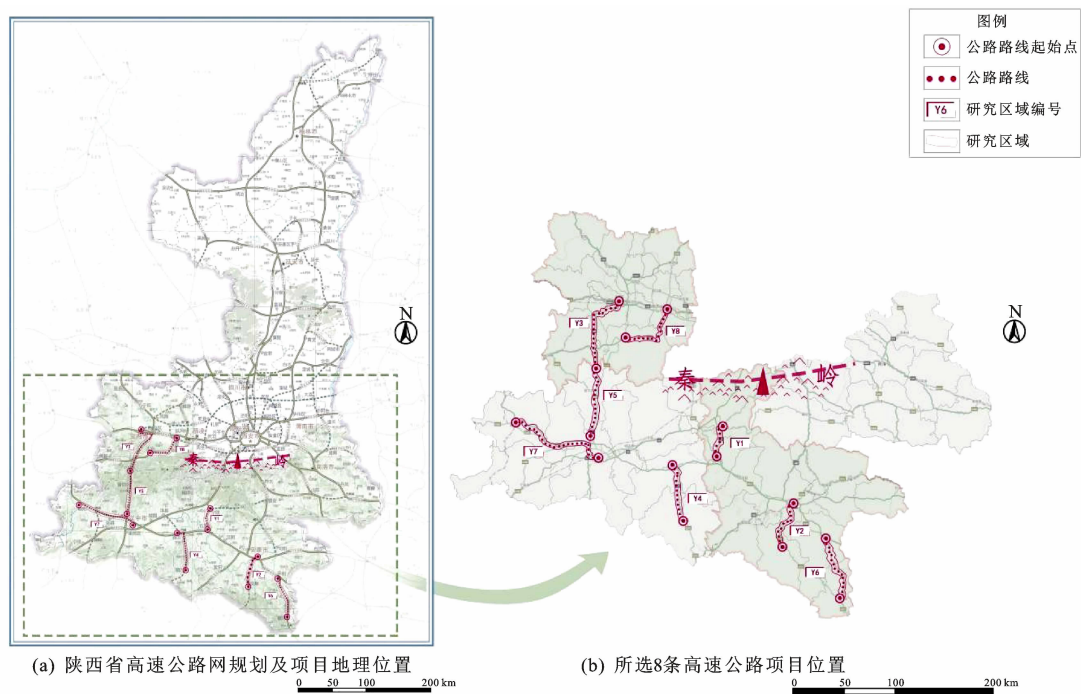


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

根据《公路建设项目环境影响评价规范》(JTGB03—2006)、《环境影响评价技术导则生态影响》(HJ 19—2022)相关规范及施工现场调研、专家咨询得出各类生态环境影响评价范围,如表 1 所示。研究范围选取公路中心线两侧各 300 m 以内的区域及其他临时工程占地范围。深入研究秦岭山区高速公路路域生态环境特征与公路施工工程对路域生

态影响的特点,因地制宜地构建多层次多维度的秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系,采用主成分分析方法进行实例分析。

2 数据来源与指标体系

2.1 数据来源

考虑到数据的准确性与可获取性,本文所使用

表 1 环境影响评价范围
Table 1 Scope of environmental impact assessment

评价对象	评价范围
生态环境	路中心线两侧各 300 m 以内地区以及取、弃土场和其他临时占地
水环境	跨河桥梁上游 100 m 至下游 1 000 m 内;平行河流由线位至河流的区域
社会环境	路中心线两侧各 200 m 范围内的敏感点(如居民点、学校等)以及工程直接影响区
环境噪声	路中心线两侧各 200 m 内
大气环境	路中心线两侧各 200 m 内

的原始数据来源于山区高速公路现场调研勘察、施工人员咨询以及参照《生产建设项目水土流失防治标准》(GB/T 50434—2018)、8 条高速公路($Y_1 \sim Y_8$)的《环境影响报告书》。高速公路施工工程、生态影响部分原始数据可直接根据 8 条高速公路《环境影响报告书》的项目工程概况、环境概况获取,但因施工期间产生的不确定性,具体施工中所占用的临时用地面积由高速公路设计方提供、施工中新增的水土流失量根据美国通用的水土流失方程式(USLE)进行计算。根据《生产建设项目水土流失防治标准》(GB/T 50434—2018)及现场调研测量,对水土流失的总治理度、林草植被恢复率、绿化覆盖率等原始数据进行获取,其他数据可由现有原始数据经数学公式运算后得出。

2.2 秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系构建

2.2.1 评价指标选取

山区高速公路施工期间对路域生态影响的关键

性、复杂性及多维性要求其评价体系应具有多层次多指标的综合性,评价指标的选取应具有侧重性、实践性及全面性。因此,在具体指标的选择上,对山区高速公路施工工程实际情况、已有研究成果及相关政策法规进行归纳总结,从工程建设强度、生态影响程度、景观恢复力度 3 个准则层面选取评价指标,其选取思路及衍生过程如图 2 所示。对于 3 类指标相互作用关系的讨论如图 3 所示,高速公路工程建设的

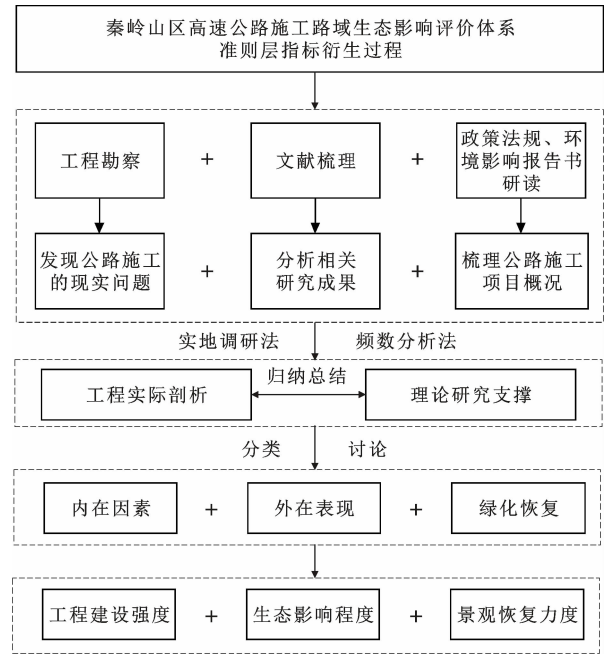


图 2 秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价体系准则层指标衍生过程
Fig. 2 Derivation process of indicators from criteria layer of ecological impact assessment system for highway construction in Qinling Mountains

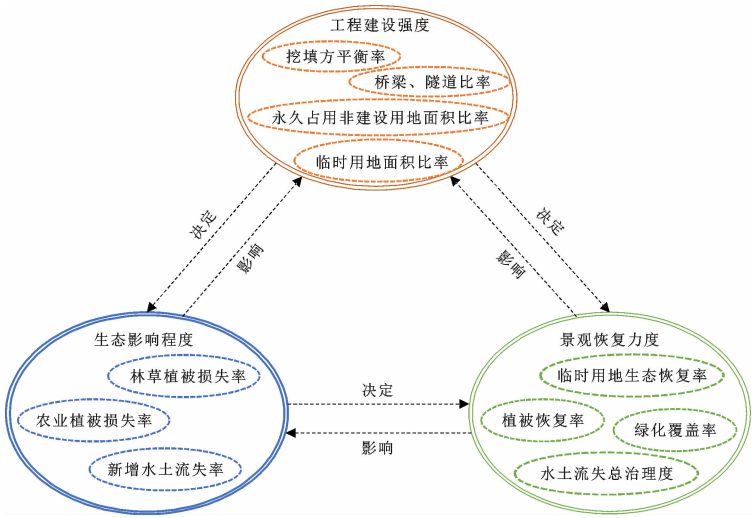


图 3 秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价体系准则层 3 类指标相互作用关系
Fig. 3 Interaction relationship between three types of indicators in ecological impact assessment system criteria layer of construction area of highways in Qinling Mountains

强度对于路域生态影响程度及景观恢复力度具有决定性作用,根据施工举措的影响程度及空间范围不同,所产生的生态影响不同,应有针对性的对施工过程中遭到破坏的生态环境进行恢复;根据路域生态受损程度选取人工景观绿化的工程技术,同时施工过程中对路域生态产生的影响及人工景观绿化等生态恢复工程又会反作用于公路主体工程。

(1) 工程建设强度

山区高速公路施工建设强度是对路域生态产生影响的内在因素,对公路施工各项举措的分析是把握施工建设项目生态环境影响特点的重要手段,应在指标体系中得到充分体现。首先,山区高速公路施工建设在线性指标和地质条件满足的基础上,应当顺应地形,避免大填大挖,努力做到挖填方平衡,减少弃方,最大化减少土石方量和对植被的破坏;山区高速公路建设常采用高桥隧比,减少对山体的扰动;综合考量永久占地的合理性,减少对耕地、林地等非建设用地的永久性占用;临时用地应根据工程设计及实际情况,从生态保护角度出发,因地制宜选取临时用地位置,合理设置临时用地的数量面积,尽量利用现有的建设用地,避免破坏地表植被和土壤结构,降低生态系统功能。

因此,本文选取工程建设强度作为准则层指标。工程建设强度评价指标的选取主要包括挖填方平衡率、桥梁、隧道比率、临时用地面积比率、永久占用非建设用地面积比率。

(2) 生态影响程度

山区高速公路施工对沿线生态破坏往往是多方面的。目前高速公路施工建设极为重视对路域生态产生的影响,分析高速公路施工建设对沿线路域生态的影响,有助于沿线路域生态的保护与恢复,提升高速公路路域生态环境效益。首先,公路建设施工永久占地及临时用地主要包括取土场、弃土(渣)场、施工生产生活区、施工便道等,通过压损和占地等破坏方式,占用了大部分林地、耕地、湿地等非建设用地,在路基施工过程中不可避免会通过机械对坡面进行开挖、填埋、碾压等操作,将表土、底层生土及施工废料(砖、石、水泥等)混合在一起,作为废弃的土方处理,导致土壤肥力下降,林草植被及农业植被量遭到损失;其次,施工工程对沿线路域生态的影响主要表现在水土流失量增加。公路工程项目的水土流失主要发生在施工期,分布区域主要包括主体工程区域及其他临时工程区域。例如由于取土场的

土方开采,扰动原有地表结构,同时在外力作用下,极有可能出现滑坡甚至坍塌等危害,从而产生新的水土流失;除此之外,在公路施工过程中产生的弃渣、公路施工内堆放的土石沙料以及临时性的施工便道,如果没有必要的保护措施,在遇到恶劣天气情况下,也会导致水土流失量的增加。公路桥梁建设需在河流中架设桥墩,产生的泥浆造成了水质污染。公路线性特征造成的生境阻隔,导致生物栖息地丧失、生物量及物种丰富度发生变化。通过实地调研及专家咨询可知:桥墩建设产生的泥浆对水体颜色、浊度产生了一定影响,但通过水体自身的净化能力,水体颜色、浊度经过一段时间后可自行恢复,无需进行人工恢复。秦岭山区高速公路沿线施工区域范围内主要影响野生动物为鱼类,对秦岭山区内大型哺乳类动物及其他濒危珍稀野生动物影响较小,因此未选取水资源影响及动物影响相关评价指标。

因此,本文选取生态影响程度作为准则层指标。生态影响程度评价指标的选取主要包括林草植被损失率、农业植被损失率、新增水土流失率。

(3) 景观恢复力度

公路施工的同时做好相关人工景观绿化恢复工作,景观绿化是山区高速公路施工建设重要的配套工程,不仅对工程施工区域生态恢复有重大意义,还有利行车安全。高速公路施工区域人工景观绿化指在高速公路施工路域范围内运用人工技术手段将绿色植物合理覆盖在公路两侧边坡、分隔带及公路施工范围内的一切可绿化空地,在不影响交通安全前提下,栽植绿色植物覆盖裸地及构筑物,恢复自然生态,减少水土流失,发挥积极环境效益的手段和过程。首先,根据实际调研取证,山区高速公路建设施工过程中的取土场、弃土(渣)场、施工便道、施工场地等临时工程区域在竣工后进行复垦复耕或植被恢复,逐步实现生态恢复;其次,对施工区域范围内的可绿化区域如开挖形成的裸露边坡实施开挖一级防护一级的施工举措,产生台面条件适宜的实施覆土着地、植树种草等绿化措施、对路基路侧及中央分隔带等开展土地修整、废渣清理、表土覆盖、植被恢复等人工复绿举措,增加植被数量,增大绿化覆盖率,以期达到美化公路环境、建设良好长效的生态基底,促进公路沿线自然生态恢复的目的,让山区高速公路形成一道美丽风景线。

因此,本文选取景观恢复力度作为准则层指标。景观恢复力度评价指标的选取主要包括临时

用地生态率、植被恢复率、绿化覆盖率、水土流失总治理度。

2.2.2 评价指标体系建立

本文在参考已有研究成果的基础上,结合研究区域的实际情况,选取工程建设强度、生态影响程度、景观恢复力度 3 个准则层指标,挖填方平衡率、桥梁、隧道比率、临时用地面积比率、永久占用非建设用地面积比率、林草植被损失率、农业植被损失率、新增水土流失率、临时用地生态恢复率、植被恢复率、绿化覆盖率、水土流失总治理度共 11 个因子层指标,建立多维度、多层次的秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系,如表 2 所示。因子层指标均为定量指标,其具体计算公式如表 3 所示。其中正向指标包括桥梁、隧道比率、临时用地生态恢复率、植被恢复率、绿化覆盖率、水土流失总治理度五个指标,负向指标包括挖填方平衡率、临时用地面积比率、永久占用非建设用地面积比率、林草植被损失率、农业植被损失率、新增水土流失率 6 个指标,各项评价指标的原始数据如表 4 所示,对各项评价指标的原始数据采用原始逆向变量的负数来进行正

表 2 秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系
Table 2 Ecological impact assessment index system for highway construction in Qinling Mountains

目标层	准则层	因子层
秦岭山区高速公路施工路域生态影响评价指标体系	工程建设强度(A ₁)	挖填方平衡率(A ₁₁)
		桥梁、隧道比率(A ₁₂)
		临时用地面积比率(A ₁₃)
		永久占用非建设用地面积比率(A ₁₄)
	生态影响程度(A ₂)	林草植被损失率(A ₂₁)
		农业植被损失率(A ₂₂)
		新增水土流失率(A ₂₃)
	景观恢复力度(A ₃)	临时用地生态恢复率(A ₃₁)
		植被恢复率(A ₃₂)
		绿化覆盖率(A ₃₃)
		水土流失总治理度(A ₃₄)

向化处理,如表 5 所示。

3 分析与结果

3.1 主成分提取

本文采用 Python 3.7.13 scikit learn1.2.2 版本库进行主成分分析(PCA)建模,其中n-components

表 3 评价指标计算公式
Table 3 Formulae for calculating evaluation indicators

评价指标	计算公式	式中字母含义
挖填方平衡率 A ₁₁ /%	$A_{11} = \begin{cases} \frac{100(T_1 - T_2)}{T_1} \\ \frac{100(T_2 - T_1)}{T_2} \end{cases}$	T ₁ 为挖方总量;T ₂ 为填方总量
桥梁、隧道比率 A ₁₂ /%	$A_{12} = \frac{100D_e}{L_e}$	D _e 为桥梁、隧道长度;L _e 为高速公路总长度
临时用地面积比率 A ₁₃ /%	$A_{13} = \frac{100S_l}{S_z}$	S _l 为临时用地面积;S _z 为工程总占地面积
永久占用非建设用地面积比率 A ₁₄ /%	$A_{14} = \frac{100S_j}{S_y}$	S _j 为永久占用非建设用地面积;S _y 为永久占地面积
林草植被损失率 A ₂₁ /%	$A_{21} = \frac{100G_m}{G_z}$	G _m 为施工损失草地、灌丛、林地总量;G _z 为林草植被总量
农业植被损失率 A ₂₂ /%	$A_{22} = \frac{100S_e}{S_w}$	S _e 为施工损失农田植被生物总量;S _w 为农田植被生物总量
新增水土流失率 A ₂₃ /%	$A_{23} = \frac{100Q_l}{Q_e}$	Q _l 为施工期新增水土流失量;Q _e 为水土流失总量
临时用地生态恢复率 A ₃₁ /%	$A_{31} = \frac{100S_k}{S_m}$	S _k 为可复垦临时用地面积;S _m 为临时用地总面积
植被恢复率 A ₃₂ /%	$A_{32} = \frac{100R_b}{R_y}$	R _b 为补偿恢复植被生物总量;R _y 为已破坏植被生物总量
绿化覆盖率 A ₃₃ /%	$A_{33} = \frac{100M_h}{M_e}$	M _h 为施工期间已绿化面积;M _e 为可绿化面积
水土流失总治理度 A ₃₄ /%	$A_{34} = \frac{100W_s}{W_T}$	W _s 为采取措施治理水土流失面积;W _T 为发生水土流失总面积

表 4 各个评价指标原始数据
Table 4 Original data of various evaluation indicators

高速公路	不同评价指标原始数据										
	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	A ₃₄
Y ₁	0.920 0	0.889 0	0.335 8	0.890 1	0.868 8	0.1312	0.954 5	0.765 1	0.950 0	0.270 0	0.950 0
Y ₂	0.831 2	0.857 0	0.353 2	0.877 3	0.897 6	0.102 4	0.898 5	0.551 3	0.970 0	0.250 0	0.960 0
Y ₃	0.650 3	0.776 1	0.379 8	1.000 0	0.927 1	0.072 9	0.606 1	0.535 4	0.990 0	0.270 0	0.960 0
Y ₄	0.742 4	0.919 7	0.362 6	0.639 9	0.771 9	0.228 1	0.976 7	0.308 4	0.990 0	0.270 0	0.970 0
Y ₅	0.346 3	0.846 5	0.318 6	1.000 0	0.734 3	0.125 3	0.942 1	0.626 5	0.980 0	0.250 0	0.950 0
Y ₆	0.593 2	0.778 0	0.256 6	0.765 6	0.434 0	0.398 4	0.977 5	0.390 7	0.950 0	0.250 0	0.970 0
Y ₇	0.700 6	0.563 8	0.233 6	0.996 1	0.356 0	0.327 5	0.931 5	0.643 5	0.950 0	0.200 0	0.900 0
Y ₈	0.215 7	0.531 0	0.290 9	0.946 5	0.532 8	0.454 7	0.804 2	0.559 2	0.990 0	0.270 0	0.970 0

表 5 各个评价指标正向化处理后数据
Table 5 Data after normalization of various evaluation indicators

高速公路	不同评价指标正向化处理后数据										
	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	A ₃₄
Y ₁	−0.920 0	0.889 0	−0.335 8	−0.890 1	−0.868 8	−0.131 2	−0.954 5	0.765 1	0.950 0	0.270 0	0.950 0
Y ₂	−0.831 2	0.857 0	−0.353 2	−0.877 3	−0.897 6	−0.102 4	−0.898 5	0.551 3	0.970 0	0.250 0	0.960 0
Y ₃	−0.650 3	0.776 1	−0.379 8	−1.000 0	−0.927 1	−0.072 9	−0.606 1	0.535 4	0.990 0	0.270 0	0.960 0
Y ₄	−0.742 4	0.919 7	−0.362 6	−0.639 9	−0.771 9	−0.228 1	−0.976 7	0.308 4	0.990 0	0.270 0	0.970 0
Y ₅	−0.346 3	0.846 5	−0.318 6	−1.000 0	−0.734 3	−0.125 3	−0.942 1	0.626 5	0.980 0	0.250 0	0.950 0
Y ₆	−0.593 2	0.778 0	−0.256 6	−0.765 6	−0.434 0	−0.398 4	−0.977 5	0.390 7	0.950 0	0.250 0	0.970 0
Y ₇	−0.700 6	0.563 8	−0.233 6	−0.996 1	−0.356 0	−0.327 5	−0.931 5	0.643 5	0.950 0	0.200 0	0.900 0
Y ₈	−0.215 7	0.531 0	−0.290 9	−0.946 5	−0.532 8	−0.454 7	−0.804 2	0.559 2	0.990 0	0.270 0	0.970 0

参数设置为 0.8,代表计算出的主成分累计贡献率为 80%。最终计算结果主成分分析个数为 1 时,累计贡献率为 80.25%。这说明 1 个主成分基本反映了原始指标所涵盖的数据信息,可用来衡量秦岭山区高速公路施工路域生态影响状况。因此,提取 1 个主成分因子,计算得到 1 个因子对原始 11 个指标数据的载荷矩阵(表 6)。

评价指标与主成分的相关程度可用初始因子载荷矩阵系数表征,解释各个主成分变量的变异情况。其中,正或负值分别表示生态环境指标与主成分之间呈正或负相关;其绝对值越接近 1,表明相关程度越高,该指标越容易成为评价公路施工路域生态影响的主要指标。主成分初始因子载荷矩阵系数如表 6 所示。对各个指标权重进行计算,具体计算公式

表 6 主成分初始因子载荷矩阵系数
Table 6 Loading matrix coefficients of principal component initial factors

评价指标	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	A ₃₄
主成分初始因子载荷矩阵系数	0.462 6	−0.393 4	0.151 0	−0.124 3	0.631 8	−0.413 4	−0.079 7	0.121 1	−0.019 9	−0.028 9	0.024 1

如下

$$\omega_i = \frac{|k_i/\sqrt{f}|}{\sum_{i=1}^l |k_i/\sqrt{f}|} \tag{1}$$

数,其与 \sqrt{f} 分别为主成分中的特征根,因本文中主成分为 1,因此,特征根只有 1 个。

式中: ω_i 为第 i 个指标权重; k_i 为第 i 个指标载荷系

所得各个指标的权重如下表 7 所示。计算各个研究对象的综合得分,具体计算公式如下

表 7 各项评价指标权重
Table 7 Weights of various evaluation indicators

评价指标	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	A ₃₄
权重	0.188 8	0.160 6	0.061 6	0.050 7	0.257 9	0.168 7	0.032 5	0.049 4	0.008 1	0.011 8	0.009 8

$$y^j = \sum_{i=1}^l c_i^j \omega_i \tag{2}$$

式中: y^j 为第 j 条公路评价结果; c_i^j 为第 j 条公路中第 i 个指标值。

3.2 结果分析

由表 8 可知:8 条山区高速公路施工路域生态影响评价综合得分从高到低依次为 Y_5 、 Y_6 、 Y_8 、 Y_7 、 Y_4 、 Y_3 、 Y_2 、 Y_1 。8 条高速公路各项评价指标得分情况如表 9 所示。

表 8 八条山区高速公路施工路域生态影响评价综合得分与排名
Table 8 Comprehensive scores and ranking of ecological impact assessment of construction area of eight mountainous highways

高速公路	综合得分	排名
Y_1	-0.315 9	7
Y_2	-0.316 0	8
Y_3	-0.296 2	6
Y_4	-0.280 6	5
Y_5	-0.189 7	1
Y_6	-0.213 1	2
Y_7	-0.233 3	4
Y_8	-0.213 3	3

表 9 八条高速公路各个指标得分

Table 9 Scores of various indicators for eight highways

高速公路	不同评价指标得分										
	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}
Y_1	-0.173 7	0.142 7	-0.020 7	-0.045 1	-0.224 0	-0.022 1	-0.031 1	0.037 8	0.007 7	0.003 2	0.009 3
Y_2	-0.156 9	0.137 6	-0.021 8	-0.044 5	-0.231 4	-0.017 3	-0.029 2	0.027 2	0.007 9	0.003 0	0.009 4
Y_3	-0.122 8	0.124 6	-0.023 4	-0.050 7	-0.239 1	-0.012 3	-0.019 7	0.026 5	0.008 1	0.003 2	0.009 4
Y_4	-0.140 2	0.147 7	-0.022 3	-0.032 5	-0.199 0	-0.038 5	-0.031 8	0.015 2	0.008 1	0.003 2	0.009 5
Y_5	-0.065 4	0.135 9	-0.019 6	-0.050 7	-0.189 3	-0.021 1	-0.030 7	0.031 0	0.008 0	0.003 0	0.009 3
Y_6	-0.112 0	0.124 9	-0.015 8	-0.038 8	-0.111 9	-0.067 2	-0.031 8	0.019 3	0.007 7	0.003 0	0.009 5
Y_7	-0.132 3	0.090 5	-0.014 4	-0.050 5	-0.091 8	-0.055 3	-0.030 3	0.031 8	0.007 7	0.002 4	0.008 8
Y_8	-0.040 7	0.085 3	-0.017 9	-0.048 0	-0.137 4	-0.076 7	-0.026 2	0.027 6	0.008 1	0.003 2	0.009 5

Y_3 、 Y_5 得分较高的前 5 个指标由高到低排序为 A_{21} 、 A_{12} 、 A_{11} 、 A_{14} 、 A_{31} ; Y_4 得分较高的前 5 个指标由高到低排序为 A_{21} 、 A_{12} 、 A_{11} 、 A_{22} 、 A_{14} ; Y_6 得分较高的前 5 个指标由高到低排序为 A_{12} 、 A_{11} 、 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{14} ; Y_7 得分较高的前 5 个指标由高到低排序为 A_{11} 、 A_{21} 、 A_{12} 、 A_{22} 、 A_{14} ; Y_8 得分较高的前 5 个指标项由高到低排序为 A_{21} 、 A_{12} 、 A_{22} 、 A_{14} 、 A_{31} 。

8 条高速公路各个指标得分中,有 7 条高速公路($Y_1 \sim Y_7$)得分最高的 3 项评价指标均为 A_{21} 、 A_{11} 、 A_{12} ,且这 3 个指标得分均在各条高速公路总得分中占比最大。反映出所选取的研究区域内高速公路施工路域生态最易受到因施工导致的林草

Y_5 得分最高,说明该条高速公路施工修建过程中对沿线路域生态产生的影响总体相对较小,该条高速公路挖填平衡率偏小,土石方利用率较高;同时因该条公路临时占地以山坡荒地、河滩地、沟间谷地为主,占耕地较少,林草植被损失率相对较低,农田植被生物量损失较小,且临时用地的复垦率较高,对当地农业生产影响很小。 Y_2 得分最低,说明该条高速公路施工修建过程中对沿线路域产生的总体生态影响相对较大,挖填方平衡率偏大,土石方利用率较低,临时工程占地面积与永久占用非建设用地的面积较大,林草植被损失率相对最高,对沿线植被的破坏较为严重,导致地表裸露,施工期间新增水土流失量较大,对沿线路域生态产生的影响总体相对较大。

通过对各条高速公路各个评价指标得分进行数值大小(不考虑数值的正负性)比较,如图 4 所示,可以看出得分从高到低排名前 5 个指标在总体得分中占比较大。其中: Y_1 得分较高的前 5 个指标由高到低排序为 A_{21} 、 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{14} 、 A_{31} ; Y_2 得分较高的前 5 个指标项由高到低排序为 A_{21} 、 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{14} 、 A_{23} ;

植被破坏、挖填方平衡、桥梁隧道比率的影响。其次得分较高的 5 个指标为 A_{14} 、 A_{22} 、 A_{23} 、 A_{31} 、 A_{13} ,虽各条高速公路的这 5 个指标得分先后排序不一致,但上述 5 个指标得分均在各条高速公路总得分中占比较大,总体上反映出永久及临时工程占地导致的土地破坏、耕地林地面积减少、地表裸露面积增大、水土流失增加、临时工程完工后的生态恢复程度对高速公路施工路域生态较易产生影响。其他 3 个指标如 A_{32} 、 A_{33} 、 A_{34} ,反映出在高速公路主体工程竣工后进行人工景观绿化对施工路域的生态环境恢复产生了一定的积极影响,竣工后施工路域生态环境逐渐恢复,随着时间推移,暂时性的影响破坏逐渐消失。

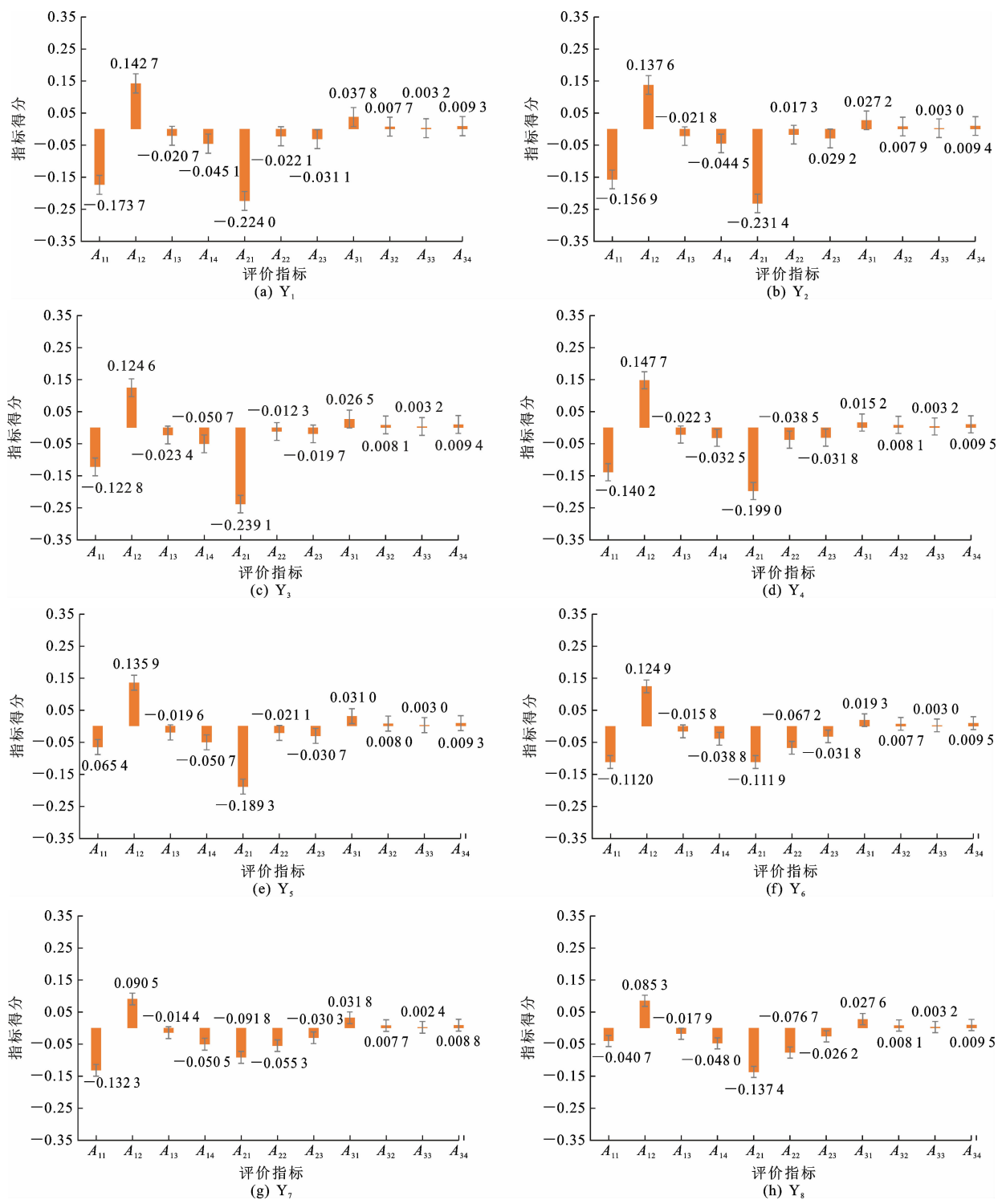


图4 各条高速公路各项评价指标得分

Fig. 4 Scores of various evaluation indicators for each expressway

4 结 语

(1)本文以秦岭山区高速公路施工建设对沿线路域生态产生一定负面影响为切入点,通过对秦岭山区高速公路施工工程的深入研究,结合已有相关研究成果,从工程建设强度、生态影响程度、景观恢

复力度 3 个维度选取了挖填方平衡率、桥梁、隧道比率、临时用地面积比率、永久占用非建设用地面积比率、林草植被损失率、农业植被损失率、新增水土流失率、临时用地生态恢复率、植被恢复率、绿化覆盖率、水土流失总治理度共 11 个评价指标构建了多维度、多层次的秦岭山区高速公路施工路域生态影响

评价指标体系。利用主成分分析(PCA)法,提取 1 个主成分,确定各个指标权重并计算各条高速公路的综合得分。根据评价结果中各条高速公路各个指标的得分占比情况可知,秦岭山区高速公路施工路域生态最易受到林草植被损失、挖填方平衡以及桥梁、隧道占比的影响。较易受到永久占用非建设用地面积占比、农业植被损失,新增水土流失及临时用地生态恢复的影响,除此之外,植被恢复、绿化覆盖、水土流失治理程度等也对路域生态产生一定影响。

(2)综上所述,在高速公路施工建设过程中应建立永久性生态占用的刚性约束,做好土石方挖填调运的动态平衡。实施桥隧比最优化设计,推行近自然工法,减少由于对山体的扰动导致林草植被生物资源的损失。构建临时用地弹性恢复体系,提高临时用地生态恢复效率。坚持宜农则农、宜林则林。施工结束后进行立地条件重构,做好表土的剥离和存放,及时进行土地翻耕、表土回覆,恢复原有功能;实施人工工程生态修复,全面系统的进行景观绿化设计。建立“防护带-过渡带-自然带”景观梯度修复模型,丰富公路全线的景观效果。

(3)当前由于研究数据获取面临施工动态性挑战,需基于施工过程的动态特征进行数据流变分析。针对施工过程中数据实时更新的难题,下一步将通过搭建施工-监测数据交互平台,实施现场实测与系统录入双校验机制等方法,实现工程数据的动态校准与同步更新。

参考文献:

References:

[1] 屈宇航,吴啸宇,张 鑫,等. 基于综合权重的高速公路建设项目对环境影响评价[J]. 交通科技与经济, 2022,24(2):64-68,75.
QU Yu-hang, WU Xiao-yu, ZHANG Xin, et al. Environmental impact assessment of highway construction projects based on comprehensive weights[J]. Transportation Science and Economy, 2022, 24(2): 64-68, 75.

[2] 赵胜男. 公路建设的景观生态影响以及生态公路建设研究[J]. 现代园艺,2014(6):155-156.
ZHAO Sheng-nan. Landscape ecological impact of highway construction and research on ecological highway construction[J]. Modern Horticulture, 2014(6): 155-156.

[3] 张静晓,刘 洋,杨 琦. 面向重大线性工程的施工道路沿线生态环境影响因素与绿化措施研究[J]. 中国

公路学报,2023,36(5):231-243.
ZHANG Jing-xiao, LIU Yang, YANG Qi. Research on ecological environment influencing factors and greening measures along construction roads for major linear projects[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 231-243.

[4] 张正一,王朝辉,张 廉,等. 中国绿色公路建设与评估技术[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(5): 76-86.
ZHANG Zheng-yi, WANG Chao-hui, ZHANG Lian, et al. Construction and assessment technology of green highway in China[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 76-86.

[5] 王玉国. 坝上地区高速公路路基施工生态环境安全技术探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(11): 34-35,42.
WANG Yu-guo. Discussion on ecological environment safety technology of highway roadbed construction in Dam area[J]. Highway and Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15 (11): 34-35, 42.

[6] 吴梦军,方 林,贺欣悦,等. 西南岩溶地区公路隧道生态环境影响评价[J]. 环境科学与技术,2018,41(增 1): 325-330.
WU Meng-jun, FANG Lin, HE Xin-yue, et al. Ecological environmental impact assessment of highway tunnels in southwestern karst region[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41(S1): 325-330.

[7] 卢 尧. 公路桥梁对生态环境的影响与保护措施[J]. 黑龙江交通科技,2016,39(6):121-122.
LU Yao. Impact of highway bridges on ecological environment and protection measures [J]. Heilongjiang Transportation Science and Technology, 2016, 39(6): 121-122.

[8] 姚小兰,周 琳,吴挺勋,等. 海南热带雨林国家公园高速公路穿越段的景观动态与生态风险评估[J]. 生态学报,2022(16):1-9.
YAO Xiao-lan, ZHOU Lin, WU Ting-xun, et al. Landscape dynamics and ecological risk assessment of the highway crossing section in Hainan Tropical Rainforest National Park[J]. Journal of Ecology, 2022(16): 1-9.

[9] 谢泓毅,刘 杰,高玉健,等. 区域高速公路建设资源环境承载力评价方法与应用[J]. 公路,2022,67(9): 407-412.
XIE Hong-yi, LIU Jie, GAO Yu-jian, et al.

- Evaluation method and application of resource and environmental carrying capacity of regional highway construction[J]. Highway, 2022, 67(9): 407-412.
- [10] 宫先达,梁雯,刘康.基于生态足迹法的高速公路生境影响评价——以宝汉线为例[J].水土保持通报, 2012,32(5):296-300.
- GONG Xian-Da, LIANG Wen, LIU Kang. Habitat impact assessment of highway based on the ecological footprint method—A case study of the Baohan Line[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2012, 32(5): 296-300.
- [11] 徐斌,董海燕,沈建华.高速公路沿线自然景观评价方法的构建[J].中国园林,2011,27(3):69-72.
- XU Bin, DONG Hai-yan, SHEN Jian-hua. Construction of evaluation method of natural landscape along highway[J]. China Garden, 2011, 27(3): 69-72.
- [12] 殷明,肖威,纪易凡,等.高速公路生态景观质量评价指标体系和评价方法:以江苏南通为例[J].应用生态学报,2018,29(12):4128-4134.
- YIN Ming, XIAO Wei, JI Yi-fan, et al. Evaluation index system and evaluation method of highway ecological landscape quality: Taking Nantong, Jiangsu as an example[J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4128-4134.
- [13] 许大为,王冬明.基于景观评价的全桂旅游公路景观规划设计研究[J].中国园林,2006(11):17-21.
- XU Da-wei, WANG Dong-ming. Research on landscape planning and design of all-Guizhou tourist highway based on landscape evaluation[J]. Chinese Garden, 2006(11): 17-21.
- [14] 陈建业,陆旭东,王偶.长白山区公路对路域植物物种组成及多样性的影响[J].生态环境学报,2010,19(2): 373-378.
- CHEN Jian-ye, LU Xu-dong, WANG Ti. Impacts of Changbai Mountain highway on the species composition and diversity of roadside plants[J]. Journal of Ecological Environment, 2010, 19(2): 373-378.
- [15] 历胤男,马晓龙,李守峰.高速公路改扩建对自然保护区生物多样性影响评价-以吉林扶余洪泛湿地省级自然保护区为例[J].林业勘查设计,2021,50(4):1-5.
- LI Yin-nan, MA Xiao-long, LI Shou-feng. Assessment of the impact of expressway reconstruction and expansion on biodiversity in nature reserves: A case study of the fuyu floodplain wetland provincial nature reserve in Jilin province[J]. Forestry Exploration and Design, 2021, 50(4): 1-5.
- [16] MIR M F, KATAYOUN H. Ecological effects of forest roads on plant species diversity in Caspian forests of Iran[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 255-261.
- [17] 张前进,陈永生,刘华,等.合肥环城高速公路防护林带土壤重金属污染及主要树种富集能力[J].生态学报,2021,40(6):1775-1782.
- ZHANG Qian-jin, CHEN Yong-sheng, LIU Hua, et al. Soil heavy metal pollution and enrichment capacity of major tree species in the protection forest belt of Hefei Ring Highway[J]. Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1775-1782.
- [18] 卜兴兵,俸强,廖翀,等.基于主成分分析法的高速公路土壤重金属污染研究[J].安全与环境学报, 2022,22(4):2241-2247.
- BU Xing-bing, FENG Qiang, LIAO Chong, et al. Research on heavy metal contamination in highway soil based on principal component analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 2241-2247.
- [19] 周怡,吴秋梅,樊亚男,等.江苏省典型高速公路沿线土壤重金属分布特征及影响因素研究[J].土壤通报,2023,54(1):161-170.
- ZHOU Yi, WU Qiu-mei, FAN Ya-nan, et al. Characteristics of soil heavy metal distribution and influencing factors along typical highways in Jiangsu Province[J]. Soil Bulletin, 2023, 54(1): 161-170.
- [20] 周正祥,张桢祺,凌征武,等.高速公路水环境影响后评价量化模型研究[J].公路交通科技(应用技术版), 2016,12(4):320-326.
- ZHOU Zheng-xiang, ZHANG Zhen-zhen, LING Zheng-wu, et al. Research on quantitative modeling of post-evaluation of highway water environment impact[J]. Highway and Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2016, 12(4): 320-326.
- [21] 赵兵.高速公路水环境敏感路段桥面径流污染生态环境效应试验研究[J].公路,2018,63(2):243-248.
- ZHAO Bing. Experimental study on the ecological and environmental effects of bridge deck runoff pollution in water environment sensitive sections of highways[J]. Highway, 2018, 63(2): 243-248.
- [22] ZUTSHI A, CREED A. An international review of environmental initiatives in the construction sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 98: 92-106.
- [23] 张昱,叶芝祥,杨怀金,等.高速公路大气细颗粒物污染特征研究[J].环境科学与技术,2017,40(2): 158-162,167.

- ZHANG Gang, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, et al. Characterization of atmospheric fine particulate matter pollution on highways [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40 (2): 158-162, 167.
- [24] PATTON A P, PERKINS J, ZAMORE W. Spatial and temporal differences in traffic-related air pollution in three urban neighborhoods near an interstate highway[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 309-321.
- [25] 殷云龙,王双生.公路绿化服务与公路绿化建设标准的探讨[J].中国园林,2004(10):43-44.
- YIN Yun-long, WANG Shuang-sheng. Discussion on highway greening service and highway greening construction standard[J]. China Garden, 2004(10): 43-44.
- [26] 赵 恒,耿靓靓,刘有军,等.高速公路中央分隔带防眩植物选择方法[J].公路,2022,67(9):399-406.
- ZHAO Heng, GENG Liang-liang, LIU You-jun, et al. Selection method of anti-glare plants for highway median [J]. Highway, 2022, 67 (9): 399-406.
- [27] 张 捷,周晓晴,徐 辉.黑龙江省高速公路绿化植物选择及应用[J].植物研究,2013,33(3):371-378.
- ZHANG Jie, ZHOU Xiao-qing, XU Hui. Selection and application of greening plants for highways in Heilongjiang Province[J]. Plant Research, 2013, 33(3): 371-378.
- [28] 李云鹏,崔玉萍,陈双全,等.大循高速公路边坡植被恢复植物种组合筛选试验研究[J].公路,2021,66(9): 347-352.
- LI Yun-peng, CUI Yu-ping, CHEN Shuang-quan, et al. Screening experimental study on plant species combinations for slope vegetation restoration on Dazhuan highway [J]. Highway, 2021, 66 (9): 347-352.
- [29] 王华俊,卿翠贵,邓检良,等.高速公路边坡既有硬质坡面的绿化技术研究[J].公路,2019,64(6): 256-259.
- WANG Hua-jun, QING Cui-gui, Deng Jian-liang, et al. Research on greening technology of highway slopes with existing hard slopes[J]. Highway, 2019, 64(6): 256-259.
- [30] 付 旭,刘晓立,周晓旭,等.秸秆泥综合防护技术在公路边坡绿化中的应用[J].公路,2015,60(9): 249-253.
- FU Xu, LIU Xiao-li, ZHOU Xiao-xu, et al. Application of straw mud integrated protection technology in highway slope greening[J]. Highway, 2015,60(9): 249-253.
- [31] 罗永宏.公路绿化生态恢复与绿化养护技术[J].交通世界,2021(增1):219-220.
- LUO Yong-hong. Highway greening ecological restoration and greening maintenance technology[J]. Transportation World, 2021(S1): 219-220.
- [32] MASTURA B, MOHD R H, MUHD Z A M. Assessment framework for pavement material and technology elements in green highway index [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1240-1246.
- [33] 危春根,程逸楠,刘 杰,等.华南山区高速公路景观设计理念与实践分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(8):305-310.
- WEI Chun-gen, CHENG Yi-nan, LIU Jie, et al. Analysis of landscape design concepts and practices for expressways in mountainous Areas of South China [J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(8): 305-310.
- [34] 黄 雯,焦天涵.基于高速公路交旅融合背景的景观设计研究——以G3W德州至上饶高速黄山段二期工程为例[J].工程与建设,2023,37(5):1439-1441,1449.
- HUANG Wen, JIAO Tian-han. Research on landscape design based on the background of integration of transportation and tourism on expressways: A case study of the second phase project of G3W Expressway from Dezhou to Shangrao in Huangshan section [J]. Engineering and Construction, 2023, 37(5): 1439-1441, 1449.
- [35] 刘德溥,吕诗静,王志泰.基于场地特征的贵州山地公路景观设计研究-以凯雷公路景观设计为例[J].中外公路,2019,39(1):306-310.
- LIU De-pu, LU Shi-jing, WANG Zhi-tai. Research on landscape design of mountainous highway in Guizhou based on site characteristics: A case study of the Kaili-Leishan Highway landscape design [J]. China and Foreign Highway, 2019, 39(1): 306-310.
- [36] 刘明文,陈 芳,周智海.贵州省仁赤高速公路景观营造分析[J].公路交通技术,2017,33(1):125-130.
- LIU Ming-wen, CHEN Fang, ZHOU Zhi-hai. Analysis of landscape construction of Renchi expressway in Guizhou Province[J]. Highway Traffic Technology, 2017, 33(1): 125-130.
- [37] 石振武,王金茹,谭兆秋.基于TOPSIS的黑龙省公路施工路域生态环境影响评价研究[J].公路工程,2021,46(1):239-247.

SHI Zhen-wu, WANG Jin-ru, TAN Zhao-qiu. Research on ecological environmental impact assessment of highway construction in Heilongjiang Province based on TOPSIS [J]. Highway Engineering, 2021, 46(1): 239-247.

[38] TAVARES D H, PADGETT J E, PAULTRE P. Fragility curves of typical as-built freeway bridges in eastern Canada [J]. Engineering Structures, 2012, 40: 107-118.

[39] 曲道来. 基于生态影响的高速公路施工组织设计及优化[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.

QU Dao-lai. Highway construction organization design and optimization based on ecological impact [D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2017.

[40] 李建豪,陶建斌,程 波,等. 秦岭山区植被春季物候的海拔敏感性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2089-2097.

LI Jian-hao, TAO Jian-bin, CHENG Bo, et al. Altitudinal sensitivity of spring phenology of vegetation in the Qinling Mountains[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 2089-2097.

[41] 李君轶,傅伯杰,孙九林,等. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径[J]. 自然资源学报, 2021, 36(10): 2449-2463.

LI Jun-yi, FU Bo-jie, SUN Jiu-lin, et al. Ecological civilization construction in the Qinling Mountains in the new period: Problems and development path[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(10): 2449-2463.

[42] 冯 慧. 秦岭重要生态功能区路域生态影响评估及优化策略研究[D]. 西安:西北大学, 2020.

FENG Hui. Research on ecological impact assessment and optimization strategy of roads in important ecological function areas of qinling mountain[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.