

黄土边坡防护工程碳排放评价体系与模型构建

肖金存^{1,2},谢婉丽^{1,2*},王二云³,黄 煜^{1,2},刘琦琦^{1,2},严 明^{1,2},何高锐^{1,2} 1.西北大学 地质学系,西安 710069 2.西北大学 大陆动力学国家重点实验室,西安 710069 3.陕西涌鑫矿业有限责任公司,榆林 719407

摘 要:近年来,边坡防护工程因产生大量的温室气体备受社会各界关注,但关于黄土边坡防护工程碳 排放的相关研究鲜有报道。基于生命周期评价理论,将黄土边坡防护工程分为生产阶段、运输阶段、施 工阶段与维护管理四个主要阶段,建立黄土边坡防护工程的碳排放评价体系;采用碳排放系数法对各阶 段评价指标的碳排放量进行计算,使用 CRITIC 法对指标进行权重分析,考虑绿色植被的固碳能力,构 建黄土边坡防护工程的碳排放评价模型。以具体工程为例,采用该模型对不同方案的碳排放量进行评 价,结果表明:柔性支护新技术总碳排放量远小于传统支护技术,能率先达到零排放,节能减排优势明 显。可为边坡防护柔性新技术的推广提供理论依据。

关键词:黄土边坡防护工程;生命周期;CRITIC法;碳排放评价模型

Carbon emission assessment system and model construction of loess slope protection project

XIAO Jincun^{1,2}, XIE Wanli^{1,2*}, WANG Eryun³, HUANG Yu^{1,2}, LIU Qiqi^{1,2}, YAN Ming^{1,2}, HE Gaorui^{1,2}

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. Shaanxi Yongxin Mining Co., Ltd., Yulin 719407, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Recently, slope protection projects have attracted much attention from all walks of life, but few reports have been devoted to carbon emissions from loess slope protection projects. By this view, this paper aims to elucidate a slope protection project in northern Shaanxi as a reference object to examine the carbon emission of the loess slope protection project through establishing a carbon emission evaluation model. *Materials and methods* Based on the life cycle assessment theory, the loess slope protection project can be divided into four main stages: production stage, transportation stage, construction stage, and maintenance management stage, and an appropriate carbon emission evaluation model for the loess slope protection project is established. To calculate the carbon emissions of the evaluation indicators in each stage, the carbon emission coefficient methodology is employed, and the CRITIC-based approach is adopted to examine the weights of the

收稿日期:2023-03-06; 录用日期:2023-04-13; 网络出版:2023-04-29

Received Date: 2023-03-06; Accepted Date: 2023-04-13; Online first: 2023-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41972292,41772323);陕西省创新能力支撑计划(2021TD-54);陕西省重点研发 计划(2022ZDLSF06-03)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41972292, 41772323); Shaanxi Province Innovation Capability Support Program (2021TD-54); Shaanxi Province Key Research and Development Program (2022ZDLSF06-03)

通信作者:谢婉丽, E-mail:xiewanli@nwu.edu.cn

Corresponding Author: XIE Wanli, E-mail: xiewanli@nwu.edu.cn

引用格式:肖金存,谢婉丽,王二云,等.2023.黄土边坡防护工程碳排放评价体系与模型构建[J].地球环境学报,14(6):786-795.

Citation: Xiao J C, Xie W L, Wang E Y, et al. 2023. Carbon emission assessment system and model construction of loess slope protection project [J]. Journal of Earth Environment, 14(6): 786–795.

indicators. Considering the carbon fixation ability of green vegetation, the carbon emission evaluation model of the loess slope protection project has been established. *Results* Taking a specific project as an example, this model is employed to evaluate carbon emissions from various designs. The achieved results reveal that the total carbon emission of the novel flexible support technology is much lower than the traditional support technology. Compared with the traditional support technology, the new one is able to reach zero emissions earlier, whose advantages of energy saving and emission reduction are noticeable. *Discussion* By analyzing the carbon emissions and the weight of each evaluation index of the concrete loess slope project, it is determined that with the increase in the consumption of materials and energy with a high carbon emission coefficient, their carbon emissions occupy a very large proportion in engineering construction. However, green vegetation is worth a lot of weight because its carbon sequestration is strongly influenced by time and region. Therefore, using green materials, reducing energy consumption, and increasing the level of green vegetation effectively contribute to the reduction of carbon emissions in engineering constructions. At the same time, the carbon emission evaluation model constructed by combining the CRITIC method and the life cycle assessment theory is capable of taking into account the weight of various factors in different time periods, which can be regarded as a valuable reference for long-term carbon emission evaluation of engineering construction. Conclusions Due to the difference in material selection, quantity, and construction methods, the carbon emission ratios of various evaluation indexes in engineering construction are dissimilar; however, the carbon emissions are mostly concentrated in the production and construction stages. Additionally, green vegetation exhibits the highest weight because it contrasts with other indicators and has high volatility, so it has great benefits in reducing carbon. Recommendations and *perspectives* In the scheme design, carbon reduction can be effectively achieved by increasing the planting area. Further, the choice of building materials should not be overlooked. The preferential exploitation of novel lowcarbon materials also leads to the reduction of the project's carbon emissions.

Key words: loess slope protection engineering; life cycle; CRITIC method; carbon emission evaluation model

目前,因温室气体的大量排放导致地球表面 变暖,继而引发海平面持续上升、极端天气频发 和大量物种灭绝等环境问题,严重危及人类的生 存与发展。温室气体主要包含 CO₂、CH₄、N₂O、 六氟化硫(SF₆)、氢氟碳化合物(HFCs)和全 氟碳化合物 (PFCs) 六类,其中以 CO_2 气体的排 放占比最大,因此削减与控制 CO,气体排放成为 控制温室效应的重点。目前,我国正处于经济建 设高速发展期,为响应21届联合国气候变化大会 通过的《巴黎协定》(曹莉和刘琰, 2022),我 国在第75届联合国大会上正式提出力争在2030 年前实现"碳达峰", 2060年前实现"碳中和" 的"双碳"目标,并推出一系列相关政策。截至 2021年,我国 CO,排放量已超过 1.19×10¹⁰ t,占 全球总量的33%,其中工程领域碳排放量占全国 总碳排放量近三分之一,降碳、减排工作仍面临 着巨大的困难与挑战(孟庆成等, 2023)。

工程建设程序复杂,包括原材料的开采、运输,材料的加工、储存,材料到现场的运输,现

场的施工,后期的管理、维护以及最后的拆除、 回收等全过程,具有生命周期特征 (Cummins and Jenks, 1989; 薛晓东, 2019)。研究人员将 生命周期评价(LCA)引入碳排放评价领域,并 取得了一定的成果。例如: 高速铁路方面, 已建 立了基于碳排放因子时空动态变化的高速铁路全 生命周期碳排放数学模型(陈进杰等, 2016), 并整理汇总了施工期各阶段主要建材和能源的碳 排放因子(郭亚林和郭春, 2021);护坡工程方 面,建立了适合河道护岸工程生命周期碳排放的 评价框架(黎维林等, 2013),还建立了挡土结 构的碳排放计算数学模型,并分析计算了三种不 同类型边坡挡土结构各阶段的碳排放量(史梦园 等,2020);建筑工程方面,通过定义建筑工地 的系统边界,依据欧洲标准计算了建筑工地整个 生命周期的碳排放量(Weigert et al., 2022); 此外,中日办公建筑全生命周期碳排放的对比结 果表明我国办公建筑在隐含碳排放和运行阶段还 有较大减碳潜力(郭诚等, 2023)。无论是高速

铁路的建设,还是建筑、护坡工程的生产,生命 周期评价理论都在碳排放评价领域发挥了举足轻 重的作用。但由于不同领域不同地区的建筑工 程类型不一、规模差异大和工程量统计分析困 难等问题(Ribeiro and Guimarães, 2021; 陈锋 等,2022; 张杰等,2022; Feng et al.,2022; Li et al.,2023),导致碳排放评价体系复杂,计算 结果误差较大(董玉平等,2022)。因此,对于 工程建设的碳排放而言,界定工程生命周期的系 统边界,选取合适的碳排放因子,构建碳排放评 价体系与模型尤为重要。

如何合理地确定工程建设各个指标的权重, 是构建其碳排放评价模型的关键所在。工程建设 中评价指标复杂多样,确定多指标权重的方法主 要有两大类:一类是主观赋权法,如AHP法、 专家评分法等;另一类是客观赋权法,如熵权 法、标准离差法、CRITIC法等(余后强和李玲, 2012)。主观赋权法具有较强的主观随意性,对 于工程建设碳排放评价有很大的局限性。相较而 言,客观赋权法更具优势,其中,CRITIC法是一 种基于指标相关性的客观赋权法,该方法用标准 差来表示指标的对比强度,用相关系数来表示指 标的冲突性。标准差越大说明波动越大, 权重越 高;相关系数值越大,说明叠加性越强,权重越 低(张静, 2021)。CRITIC法能确定各指标权 重,避免因经验知识带来的权重量化问题(张婕 和黄舒舒, 2015); 引入变异系数和相关系数的 绝对值之后, CRITIC 法能解决无法直接反映带量 纲指标内部的差异和负相关指标独立性权数的不 合理问题,客观反映指标的权重特征(何岩岩和 南灵,2018); 与熵权法结合之后, CRITIC 法能 确定隐含指标的权重,揭示隐含指标的不均衡特 征(张译文和邓菊秋, 2023)。CRITIC 法不但能 减少指标之间信息的重叠,还考虑了指标之间的 相互依赖性,可以获取更多的隐藏在数据之间的 信息,有助于得到更可信的评价结果。

随着我国西部大开发战略的进一步实施,黄 土地区工程建设规模越来越大,黄土边坡防护工 程日益增多。边坡工程在建设过程中消耗的资源 和能源会产生大量 CO₂等温室气体,但目前缺乏 关于黄土边坡防护工程碳排放量的相关研究。因 此,本文针对黄土边坡防护工程,划分工程生命 周期系统边界,分层次和分阶段构建黄土边坡防 护工程碳排放评价体系;确定碳排放的评价指标 和评价因子,采用碳排放系数法和 CRITIC 法相耦 合,构建黄土边坡防护工程碳排放评价模型,计 算黄土边坡护坡工程各阶段的碳排放量,并对评 价指标进行占比及权重分析,为黄土边坡防护工 程提供降碳减碳的最优方案。

1 三层次、四阶段的碳排放评价体系构建

1.1 基于生命周期的碳排放评价体系构建

生命周期是"从摇篮到坟墓"的整个过程。 某个产品的生命周期包括原材料的采集、加工, 产品的生产与贮存、运输与使用、报废与回收等 过程。生命周期评价则是对该产品整个过程的能 源消耗及环境影响进行评价的工具,该方法起源 于20世纪60年代,于90年代初才得到广泛应 用。近几十年,生命周期评价已从工业领域逐渐 扩展到政治、经济、环境、技术、社会等诸多领 域,尤其在工程建设碳排放评价方面产生了深刻 的影响,为降碳、减碳措施及碳排放管理提供了 技术支撑(Jensen et al., 1997; Fava, 2006)。

工程建设的生命周期一般可划分为生产阶段、运输阶段、施工阶段、维护管理和拆除回收 五个阶段(陈帝升等,2018)。但是边坡防护工 程少有拆除回收过程,故本文将边坡防护工程划 分为生产阶段、运输阶段、施工阶段和维护管理 四个阶段,并从生命周期、评价指标和评价因子 三个层次对边坡防护工程进行碳排放评价,构建 黄土边坡防护工程"三层次、四阶段"全生命周 期碳排放评价体系,如图1所示。

1.2 边坡防护工程碳排放计算边界划分

工程建设生命周期内,各类建设与生产活动 繁多,系统边界复杂。基于对碳排放计算边界划 分的相关研究(蒋超等,2022;陶源和刘伟军, 2022),结合黄土边坡防护工程特点,将工程的 计算边界划分如下:

生产阶段,包括原材料的开采与运输、工厂 的加工与处理、后期的贮存与养护等过程。在生 产阶段,主要的碳排放源为资源和能源的消耗、 工作人员和机械设备工作时产生的碳排放等。考 虑到不同材料自身性质及制造工艺差异,加工过 程中产生碳排放量不一。为了便于计算与分析, 按建材类型将常用建筑材料、金属材料、非金属 材料和其他材料作为评价指标。其中,常用建筑 材料包括水、沙子、碎石和黏土等评价因子,金

第6期

属材料包括钢材、铝、铜、锌等评价因子,非金 属材料包括砖块、水泥、砂浆、陶瓷和塑料等评 价因子,其他材料包括涂料、乳胶漆和棉布等评 价因子。

运输阶段,即将工厂生产的建筑材料运送至施

工现场,主要影响因素为材料的运输量、运输距离 以及使用的运输工具。该阶段的碳排放源主要为能 源消耗,其次是运输过程中工作人员与运输工具自 身的碳排放。该阶段以能源消耗和人工消耗为评价 指标,汽油、柴油和人工等为评价因子。



图 1 黄土边坡防护工程三层次、四阶段碳排放评价体系 Fig. 1 Three levels-four stages of carbon emission evaluation system of slope protection engineering

施工阶段,即利用现场的材料完成施工作业, 形成边坡防护工程。施工阶段碳排放源包括各类 能源(汽油、柴油和电能等)的消耗、工作人员 及机械设备产生的碳排放等。该阶段以能源消耗 和人工消耗为评价指标,汽油、柴油、电能和人 工等为评价因子。

维护管理阶段主要碳排放源为人工维护管 理。该阶段前期的植被维护中人工消耗和能源消 耗会产生碳排放。但是该阶段内,绿色植被可通 过光合作用形成碳汇,不断吸收大气中的 CO₂气 体,达到降碳减碳的目的。故该阶段的评价指标 为绿色植被、能源消耗和人工消耗,评价因子为 植生面积、汽油和人工等。

1.3 边坡防护工程碳排放评价因子确定

边坡防护工程中不同地区、不同领域以及生 产加工方式不同,因子选取存在较大差异,一般 选取常用的或者碳排放量大的建材、能源与人工 等作为评价因子。需要注意的是,黄土边坡防护 工程中部分材料的可重复利用,以及绿色植物对 温室气体的吸收等,都有助于降低工程的碳排放 量,改善环境,因此在确定评价因子的取值(碳 排放系数)时,需要将它们减少的碳排放量考虑 在内。

考虑到数据的权威性和地域性,碳排放评价 因子的取值一般源于所在地研究机构公布的数据 库,如《温室气体盘查议定书》《国家温室气体 IPCC指南》《GB/T 51366—2019,建筑碳排放计 算标准》等,或参考与碳排放系数相关的权威文 献等(黎维林等,2013;陈进杰等,2016;张孝 存,2018;中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019;史梦园等,2020;郭亚林和郭春,2021)。 收集到的主要建筑材料碳排放系数如表1所示, 各类能源和人工的碳排放系数如表2所示。

地球环境学报

	表 1 主要建筑材料碳排放系数
Tab. 1	Carbon emission coefficient of main building materials

		-8
建材种类 Types of building materials	碳排放系数 Carbon emission coefficient	单位 Unit
水 Water	0.210	$kg \cdot t^{-1}$
钢材 Steel	4.560	$\mathbf{t} \cdot \mathbf{t}^{-1}$
普通水泥 Ordinary cement	0.825	$t \cdot t^{-1}$
木材 Wood	30.300	$kg \cdot m^{-3}$
碎石 Crushed stone	3.100	$kg \cdot t^{-1}$
片石 Rubble	6.300	$kg \cdot t^{-1}$
沙子 Sand	6.600	$kg \cdot t^{-1}$
黏土 Clay	0.500	$kg \cdot t^{-1}$
普通砖 Common brick	0.286	$t \cdot m^{-3}$
土工格栅 Geogrid	0.433	$kg \cdot m^{-2}$
C20 预拌混凝土 C20 ready-mixed concrete	0.289	$t \cdot m^{-3}$
聚氯乙烯 Polyvinyl chloride	6.260	$t \cdot m^{-3}$
土工袋 Soilbag	0.310	$kg \cdot m^{-2}$

表 2 各类能源和人工的碳排放系数

Tab. 2	Carbon emission coefficients of various energy
	sources and artificial sources

能源类型 Energy type	碳排放系数 Carbon emission coefficient	单位 Unit
柴油 Diesel oil	3.164	$kg \cdot kg^{-1}$
汽油 Gasoline	2.988	$\mathrm{kg}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$
煤油 Kerosene	3.101	$kg \cdot kg^{-1}$
燃料油 Fuel oil	3.241	$kg \cdot kg^{-1}$
电能 Electric energy	0.581	$kg \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
人工 Labor	50.000	$kg \cdot d^{-1}$

2 碳排放评价模型构建与验证

2.1 黄土边坡防护工程碳排放评价模型构建

边坡防护工程中碳排放评价模型旨在计算分 析工程全生命周期中各评价指标的碳排放量及其 相互关系,对比分析它们的占比、权重等数据, 针对占比大及权重大的评价指标提出相关改善措 施,从而达到节能减碳的目的。

基于黄土边坡防护工程"三层次、四阶段" 碳排放评价体系的模型构建过程为:首先依据表 1、表2中各种建筑材料和能源的碳排放系数, 结合实际的工程量,采用碳排放系数法计算工程 生命周期各阶段评价指标的碳排放量(碳排放 量=工程量×碳排放系数)及其占比;随后根 据得到的各评价指标碳排放量,使用 CRITIC 法 分析各个评价指标的权重;最后对比分析工程各阶段评价指标对生态环境的影响。模型中维护管理阶段的绿色植被吸收 CO_2 会形成碳汇,即该阶段的碳排放量为负值。经查阅相关资料,乔灌木、草本层兼备的绿色植被,平均固碳能力为 0.932 kg·m⁻²·a⁻¹(https://www.cnstock.com/v_industry/sid_rdjj/202202/4826019.htm;褚芷萱等,2022), 固碳量 = 植生面积 × 固碳能力 × 年限。

2.2 模型应用与验证

2.2.1 工程案例

云岩镇寨子山崩塌位于陕西省延安市宜川县 云岩镇寨子山,在宜川县正北方向约26km,西距 G242国道约0.2km,处于黄土台塬与河谷阶地区 的交汇处。微地貌为陡崖,近西北一东南方向展 布,坡向西南,受河流沟谷切割作用影响,地形 破碎,呈多级陡坎状。崩塌体坡顶高程867m,坡 脚高程826m,最大高差41m,厚3m,崩塌总规 模约9.1×10³m³,崩向225°-230°,地层岩性为中 上更新统风积黄土,为小型滑移式黄土崩塌。威 胁对象为坡脚的房屋建筑以及村路(图2)。

根据崩塌特征,提出治理方案如下:

方案一(柔性支护新技术):1:0.75 削坡+ 返包式加筋土挡土墙+封堵填埋窑洞+柔性材料 排水工程+绿化工程。对崩塌体分3级台阶削方, 削坡坡比1:0.75,台阶高度6m,马道宽3m; 在崩塌体坡脚修筑护面墙,墙高2m;削坡平台、 坡脚和坡顶布置绿化工程;坡顶及马道修建排水 渠;对未削除的窑洞进行填埋。

方案二(传统支护技术):1:0.5 削坡+混 凝土挡土墙+封堵填埋窑洞+混凝土材料排水工 程+绿化工程。对崩塌体分2级台阶削方,削坡 坡比1:0.5,台阶高度8m,马道宽2m;在崩塌 体坡脚修筑护面墙,墙高2m;削坡平台、坡脚和 坡顶布置绿化工程;坡顶及马道修建排水渠;对 未削除的窑洞进行填埋。

2.2.2 云岩镇寨子山崩塌防治工程碳排放模型构建

针对云岩寨子山崩塌的两种设计治理方案, 使用黄土边坡防护工程碳排放评价模型对工程各 阶段评价因子的碳排放量进行计算分析,具体数 据如表3所示。

根据表3统计的各评价因子的碳排放量,汇 总得到各阶段评价指标的碳排放量占比,如表4 所示。 a 云岩镇寨子山崩塌全貌图 The general figure of collapse of the Zhaizi Mountain in the Yunyan Town b 拉张裂缝 Tensile crack



图 2 云岩镇寨子山崩塌 Fig. 2 The collapse of the Zhaizi Mountain in the Yunyan Town

		1				
边坡防护工程各阶段			用量		碳排放量	
		主要材料	Dosage		Carbon emission/t	
All stages	of slope protection engineering	Main material	方案一	方案二	方案一	方案二
			Scheme one	Scheme two	Scheme one	Scheme two
生产阶段 Production ···		水 Water/t	200.00	240.00	0.04	0.05
	帝田臣 村羽	碎石 Crushed stone/t	110.00	20.00	0.34	0.06
	吊用原材料 Common row motorials	片石 Rubble/t	5.00	70.00	0.03	0.44
	Common faw materials	沙子 Sand/t	40.00	55.00	0.26	0.36
		黏土 Clay/t	10.00	14.00	0.01	0.01
	金属材料 Metallic material	钢材 Steel/t	0.50	10.00	2.28	45.60
stage		普通水泥 Ordinary cement/t	20.00	50.00	16.50	41.25
	非金属材料	普通砖 Common brick/m ³	5.00	20.00	1.43	5.72
	Nonmetallic material	土工栅格 Geogrid/m ²	3250.00	0.00	1.41	0.00
		PVC 管 PVC pipe/m	0.00	200.00	0.00	0.12
运输阶段	能源消耗	汽油 Gasoline/kg	550.00	2500.00	1.64	7.47
Transport	Energy consumption	柴油 Diesel oil/kg	100.00	500.00	0.32	1.58
stage	人工消耗 Labor consumption	人工 Labor/d	7.00	11.00	0.35	0.55
故工队印	能循波耗	汽油 Gasoline/kg	6000.00	10000.00	17.93	29.88
施上阶段 Construction phase …	形你们和 Energy consumption	柴油 Diesel oil/kg	700.00	1800.00	2.21	5.70
	Energy consumption	电能 Electric energy/(kW·h)	2000.00	9500.00	1.16	5.52
	人工消耗 Labor consumption	人工 Labor/d	350.00	440.00	17.50	22.00
维护管理	绿色植被 Green vegetation	植生面积 Planting area/m ²	2500.00	2000.00	-46.60	-37.28
Maintenance	能源消耗 Energy consumption	汽油 Gasoline/kg	600.00	500.00	1.79	1.49
management	人工消耗 Labor consumption	人工 Labor/d	120.00	100.00	6.00	5.00
主由绿色枯油	存阳取 20。"" 主 一 田 碑					

表 3 各阶段评价因子的用量和碳排放量

Tab. 3 Main material consumption and carbon emission in each stage

表中绿色植被年限取 20 a, "-"表示固碳。

The age of green vegetation in the table is 20 a, and "-" indicates carbon sequestration.

根据表3、表4,方案一的总碳排放量远小于 方案二的总碳排放量。这是因为方案一采用低碳 材料的新型柔性支挡结构,代替了钢筋、混凝土 等传统材料,生产阶段碳排放量从93.61 t减少到22.30 t,降低了76.18%;施工阶段,方案一由于工程量、能源和人工消耗少,碳排放量比方案二

792

少 24.30 t,降低了 38.51%;维护管理阶段,方案 一使用的返包式植生加筋土挡土墙增加了植生面 积,绿色植被成为负向指标,具有汇碳能力,可 抵消部分工程建设的碳排放;植生面积越大,绿 色植被的固碳量越大,且随着时间的增长,累计 固碳量不断增加。根据模型计算,不考虑绿色植 被的固碳量,方案一的实际工程建设总碳排放量 为 71.20 t,方案二的实际工程建设总碳排放量为 172.80 t;方案一绿色植被每年的固碳量为 2.33 t, 方案二绿色植被每年的固碳量为 1.86 t;方案一约 在 30 a 后实现工程建设近零碳排放,方案二约在 92 a 后才能实现工程建设近零碳排放,表明方案一 的减碳效果明显高于方案二,甚至可在 50 a 内产 生净碳汇量 45.30 t,因此在黄土边坡防护工程中, 建议优选柔性支护新技术。

根据表 4, 方案一各评价指标的碳排放量占比 排序为:能源消耗(施工)>非金属材料>人工

消耗(施工)>人工消耗(维护)>金属材料> 能源消耗(运输)>能源消耗(维护)>常用建 筑材料>人工消耗(运输),碳排放量占比依次 为 29.92%、 27.16%、 24.58%、 8.43%、 3.20%、 2.75%、2.51%、0.96%、0.49%; 方案二各评价指 标的碳排放量占比排序为:非金属材料>金属材 料>能源消耗(施工)>人工消耗(施工)>能 源消耗(运输)>人工消耗(维护)>能源消耗 (维护)>常用建筑材料>人工消耗(运输), 碳排放量占比依次为 27.25%、26.39%、23.79%、 12.73% 5.24% 2.89% 0.86% 0.53% 0.32% 柔性支护新技术与传统支护技术因材料选取、用 量不同以及施工方式不同,导致工程建设中各评 价指标碳排放量占比不同。但工程建设的碳排放 量主要集中在生产阶段和施工阶段,运输阶段的 碳排放量占比很小, 而维护管理阶段因为绿色植 被的固碳能力已形成碳汇,研究结果与实际一致。

表 4 边坡防护工程各评价指标碳排放量占比 Tab. 4 Carbon emission ratio of each evaluation index of slope protection engineering 单位:% Unit:%									
生产阶段			运输阶段		施工阶段		维护管理		
	Production stage		Transport stage		Construction phase		Maintenance management		
方案 Scheme	常用建筑材料 Common building materials	金属材料 Metallic material	非金属材料 Nonmetallic material	能源消耗 Energy consumption	人工消耗 Labor consumption	能源消耗 Energy consumption	人工消耗 Labor consumption	能源消耗 Energy consumption	人工消耗 Labor consumption
方案一 Scheme one	0.96	3.20	27.16	2.75	0.49	29.92	24.58	2.51	8.43
方案二 Scheme two	0.53	26.39	27.25	5.24	0.32	23.79	12.73	0.86	2.89

为研究边坡防护工程各评价指标的权重,本文 依据两种方案下不同年限(1a、5a、10a、20a) 的各评价指标的碳排放量,使用 SPSS 软件中 CRITIC 法分析了碳排放评价模型中各评价指标的 权重,结果如图 3 所示。

根据图3可知:绿色植被的权重最大,为 34.88%。这是因为绿色植被是负向指标,与其他 正向指标的冲突性大,且绿色植物碳汇量受年限和 植生面积的影响,自身波动大。说明边坡防治工 程中绿色植物在节能减排方面发挥了重要作用, 潜力巨大。因此设计边坡防护方案时,在满足边 坡工程安全的前提下,应尽可能增大植生面积。 其他评价指标的权重排序依次为生产阶段的金属 材料(26.46%)、非金属材料(16.93%)和施工 阶段的能源消耗(12.09%)。前二者是因为其碳 排放系数大,用量上的细微变化就会引起碳排放 量的显著差异;后者是因为工程量、技术方法的 不同导致能源消耗量不同,继而引起碳排放量的 波动大。因此,建筑材料尽可能选用节能减碳的 新型材料代替耗能高排的传统材料;同时方案设 计时,应因地制宜,采用新技术避免大开大挖, 以减少工程量,降低能源消耗。其余指标权重较 小是因为自身变异性小、相互依赖性强。但是它 们产生的碳排放不容忽视,应优先选择当地材料, 减少运输距离,同时使用新能源代替传统能源, 达到降碳、减排的目的。



1: 绿色植被; 2: 金属材料; 3: 非金属材料; 4: 能源消耗(施 工); 5: 能源消耗(运输); 6: 人工消耗(施工); 7: 人工消 耗(维护); 8: 能源消耗(维护); 9: 常用建筑材料; 10: 人 工消耗(运输)。

green vegetation; 2: metallic material; 3: nonmetallic material;
 energy consumption (construct); 5: energy consumption (transport);
 labor consumption (construct); 7: labor consumption (maintain);
 energy consumption (maintain); 9: common building materials;
 labor consumption (transport).

图 3 边坡防护工程碳排放评价模型中各评价指标权重图 Fig. 3 The weight figure of each evaluation index in the carbon emission evaluation model of slope protection engineering

由于实际工况复杂,模型中尚未考虑到的次 要建筑材料较多,这些材料单一的碳排放量少, 但累计的碳排放量难以忽视;此外,绿色植被前 期需要维护,其固碳能力较弱,前期难以达到预 期的固碳量。故整体上,模型评价得到的边坡防 护工程总碳排放量与实际碳排放量相比偏低。说 明该模型还需要进一步优化,如不断地补充完善 评价体系的数据库,评价指标越多,评价模型的 准确度越高。

3 结论与展望

针对我国黄土边坡防护工程建设过程中的碳 排放现状,基于生命周期碳理论,结合 CRITIC 法 构建黄土边坡防护工程的碳排放评价模型,取得 了以下成果:

(1)基于生命周期评价理论,将黄土边坡防 护工程划分为生产阶段、运输阶段、施工阶段和 维护管理四个阶段,考虑绿色植被具有固碳能力, 提出了适合黄土边坡防护工程的"三层次、四阶 段"全生命周期碳排放评价体系。

(2)基于植被的碳汇与植生面积和时间的关 系,采用碳排放系数法计算黄土边坡防护工程各评 价因子的碳排放量,对比各个评价指标碳排放量 的占比,用 CRITIC 法分析各个评价指标的权重, 构建了黄土边坡防护工程的碳排放评价模型。

(3)以具体工程为例,采用该模型对柔性支 护新技术防治方案和传统支护技术防治方案的碳 排放量进行评价,结果表明柔性支护新技术的总 碳排放量(71.20 t)远小于传统支护技术的总碳排 放量(172.80 t),主要是因为新技术采用柔性材 料代替传统材料,大大降低了碳排放;同时柔性 支护新技术加大了绿色植被面积,增大了绿色植 被的碳汇量,施工后期相比传统技术能率先 62 a 达到零排放,节能减排优势明显。

(4)黄土边坡防护工程碳排放量评价模型的 精度依赖于评价指标和评价因子的选取,以评价 指标绿色植被为例,因植被的混合搭配方式和植 被生物的丰富度不同,绿色植被的固碳能力各异, 且随着时间的增长,绿色植被的固碳能力不断增 加。因此,如何客观且完整获取评价指标和评价 因子,不断完善黄土边坡防护工程碳排放评价体 系数据库,是优化碳排放评价模型的关键所在。

参考文献

- 曹 莉,刘 琰. 2022. 联合国框架下的国际碳交易协同 与合作——从《京都议定书》到《巴黎协定》 [J]. *中* 国金融, (23): 79-81. [Cao L, Liu Y. 2022. Collaboration and cooperation of international carbon trade under the framework of UN [J]. *China Finance*, (23): 79-81.]
- 陈帝升, 王志杰, 蒲梦龙, 等. 2018. 加筋挡土结构碳排放 计算 [J]. 四川建筑, 38(4): 229–232. [Chen D S, Wang Z J, Pu M L, et al. 2018. Calculation of carbon emission of reinforced retaining structure [J]. *Sichuan Architecture*, 38(4): 229–232.]
- 陈 锋,张 晶,任 娇,等. 2022. 基于 LMDI 模型的黄 河流域碳排放时空差异及影响因素研究 [J]. *地球环 境学报*, 13(4): 418-427. [Chen F, Zhang J, Ren J, et al. 2022. Spatiotemporal variations and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River Basin based on LMDI model [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 418-427.]
- 陈进杰, 王兴举, 王祥琴, 等. 2016. 高速铁路全生命周期 碳排放计算 [J]. 铁道学报, 38(12): 47-55. [Chen J J,

地球环境学报

Wang X J, Wang X Q, et al. 2016. Calculation of carbon dioxide emissions in the life cycle of high-speed railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 38(12): 47–55.]

- 褚芷萱,马锦义,邵海燕,等. 2022. 不同应用类型园林树 木固碳能力 [J]. 中国城市林业, 20(1): 126–129. [Chu Z X, Ma J Y, Shao H Y, et al. 2022. Carbon sequestration capacity of landscape trees of different application types [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 20(1): 126–129.]
- 董玉平,汪洪军,费 恺,等. 2022. 建筑工程施工阶段碳 排放计量方法研究 [J]. *洁净与空调技术*, (4): 98-101.
 [Dong Y P, Wang H J, Fei K, et al. 2022. Research on measurement method of carbon emission in construction stage [J]. *Contamination Control & Air-Conditioning Technology*, (4): 98-101.]
- 郭 诚,张兴惠,周 浩,等.2023.中日建筑全生命周 期碳排放对比分析 [J]. 施工技术(中英文),52(6): 126-133. [Guo C, Zhang X H, Zhou H, et al. 2023. Comparative analysis of life-cycle carbon emissions of Chinese and Japanese buildings [J]. Construction Technology, 52(6): 126-133.]
- 郭亚林,郭 春.2021. 铁路隧道施工期碳排放计算模型研 究 [J]. 交通节能与环保, 17(6): 5-9. [Guo Y L, Guo C. 2021. Calculation model of life cycle carbon emissions of railway tunnel [J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 17(6): 5-9.]
- 何岩岩,南 灵. 2018. 基于 CRITIC 权灰靶模型的土地利
 用碳排放安全评价——以陕西省为例 [J]. *江苏农业科*学, 46(20): 304–308. [He Y Y, Nan L. 2018. Evaluation of land use carbon emissions security based on CRITIC grey target model— taking Shaanxi Province as an example [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(20): 304–308.]
- 蒋 超,谢崇实,黎 昆.2022.绿色建筑全生命周期碳 排放计算实践与探讨——以重庆市设计院建研楼工 程为例 [J]. 重庆建筑, 21(6): 5-9. [Jiang C, Xie C S, Li K. 2022. Practice and discussion on carbon emission calculation in the whole life cycle of green buildings— a case study of the architectural research center building of Chongqing Architectural Design Institute [J]. Chongqing Architecture, 21(6): 5-9.]
- 黎维林,李建华,孙即梁. 2013. 河道护岸工程生命周期碳 排放评价探讨 [J]. 环境科学与技术, 36(2): 200-205. [Li W L, Li J H, Sun J L. 2013. Life cycle assessment of carbon emission in river revetment engineering [J].

Environmental Science & Technology, 36(2): 200–205.]

- 孟庆成,胡 垒,李明健,等. 2023. 基于 LCA 法的 3D 打 印建筑碳排放量及减碳效果分析 [J]. *安全与环境学* 报, 23(7): 2523-2533. [Meng Q C, Hu L, Li M J, et al. 2023. Analysis of carbon emissions and carbon reduction effect of 3D printing buildings based on LCA method [J]. *Journal of Safety and Environment*, 23(7): 2523-2533.]
- 史梦园, 王志杰, 杨广庆, 等. 2020. 不同类型挡土结 构碳排放计算与评价 [J]. *铁道勘察*, 46(4): 41-48. [Shi M Y, Wang Z J, Yang G Q, et al. 2020. Calculation and evaluation of carbon emission from different types of retaining structures [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 46(4): 41-48.]
- 陶 源,刘伟军. 2022. 大型公共建筑工程 LCA 模型下的碳 排放敏感性分析 [J]. *中国建筑金属结构*, (9): 12–14. [Tao Y, Liu W J. 2022. Sensitivity analysis of carbon emission under LCA model of large public building projects [J]. *China Construction Metal Structure*, (9): 12–14.]
- 薛晓东. 2019. 建筑生命周期碳排放评价 [J]. 四川水泥, (12): 301. [Xue X D. 2019. Assessment of carbon emission in building life cycle [J]. Sichuan Cement, (12): 301.]
- 余后强,李 玲. 2012. 基于熵权法和 CRITIC 法的五类企业综合评价 [J]. 湖北科技学院学报, 32(12): 83-84.
 [Yu H Q, Li L. 2012. Comprehensive evaluation of five types of enterprises based on entropy weight method and CRITIC method [J]. Journal of Hubei University of Science and Technology, 32(12): 83-84.]
- 张 杰,陈 海,刘 迪,等. 2022. 基于县域尺度土地利 用碳排放的时空分异及影响因素研究 [J]. 西北大学 学报(自然科学版), 52(1): 21-31. [Zhang J, Chen H, Liu D, et al. 2022. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 52(1): 21-31.]
- 张 婕,黄舒舒.2015. 基于模糊优选和 CRITIC 法的电力碳排放权区域初始分配——以华东电网区域为例[J]. 环境保护科学,41(3): 62-66. [Zhang J, Huang S S. 2015. Regional initial allocation of carbon emission in the power industry based on fuzzy optimization and CRITIC methods— taking the region of East China grid as an example [J]. Environmental Protection Science, 41(3): 62-66.]
- 张 静. 2021. 基于 CRITIC 与层次分析法耦合的生态脆弱

性评价——以东洞庭湖保护区为例 [D]. 北京:中国地 质大学(北京). [Zhang J. 2021. Ecological vulnerability assessment based on the combination of CRITIC and analytic hierarchy process— taking East Dongting Lake Reserve as an example [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).]

- 张孝存. 2018. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评 价方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学. [Zhang X C. 2018. Research on the quantitative analysis of building carbon emissions and assessment methods for low-carbon buildings and structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology.]
- 张译文,邓菊秋. 2023. 中国对外贸易隐含碳排放绩效测度 及收敛特征研究——基于 26 个产品部门的实证 [J]. *江西社会科学*, 43(1): 96–109. [Zhang Y W, Deng J Q.
 2023. Research on performance measurement and convergence characteristics of implicit carbon emissions in China's foreign trade— based on the empirical analysis of 26 product departments [J]. *Jiangxi Social Sciences*, 43(1): 96–109.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019. GB/T 51366— 2019, 建筑碳排放计算标准[S]. 北京:中国建筑 工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2019. GB/T 51366—2019, standard for building carbon emission calculation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press.]

Cummins T R, Jenks T. 1989. Using life cycle concepts to

estimate building costs [J]. The Bottom Line, 2(2): 15-17.

- Fava J A. 2006. Will the next 10 years be as productive in advancing life cycle approaches as the last 15 years? [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1): 6-8.
- Feng H C, Wang R N, Zhang H. 2022. Research on carbon emission characteristics of rural buildings based on LMDI-LEAP model [J]. *Energies*, 15(24): 9269. DOI: 10.3390/ en15249269.
- Jensen A A, Hoffman L, Møller B T, et al. 1997. Life cycle assessment— a guide to approaches, experiences and information sources [R]. Environmental Issues Series No. 6. Copenhagen: European Environmental Agency.
- Li R, Yu Y H, Cai W G, et al. 2023. Interprovincial differences in the historical peak situation of building carbon emissions in China: causes and enlightenments [J]. *Journal of Environmental Management*, 332: 117347. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117347.
- Ribeiro A A, Guimarães C S. 2021. Estimation of greenhouse gas emissions in civil construction for a modular construction on the campus of the Federal University of Rio de Janeiro, Brazil [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 1938(1): 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1938/1/ 012025.
- Weigert M, Melnyk O, Winkler L, et al. 2022. Carbon emissions of construction processes on urban construction sites [J]. Sustainability, 14(19): 12947. DOI: 10.3390/ su141912947.