

平原水网地区生态河道碳足迹量化与评价

杨子杰¹, 周滨荣^{1,2}, 魏 军³, 张雨生¹, 李 婷¹, 于来会⁴, 丁奠元¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;

2. 仪征市水利局, 江苏 扬州 225009; 3. 扬州市水利局, 江苏 扬州 225009;

4. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 在生态文明建设背景下,“双碳”建设对生态河道建设提出了新要求。目前生态河道建设中尚缺乏量化其碳排放的方法及标准。根据生态河道工程岸坡防护技术设计特点,基于全生命周期理论,利用碳足迹排放系数法,本研究重点考虑了生态河道施工阶段土方工程、混凝土工程、能源消耗和人工四个碳足迹因子。计算结果表明:在不同生态河道防护技术中,混凝土引起的碳排放占比达34.75%~93.11%,平均占比达79.02%。因而混凝土为生态河道工程中最主要的碳排放因子,其次是汽油车运输和土方开挖。在满足岸坡基本功能的前提下,仿木桩+植草岸坡防护技术节能减排效果最好。因此,生态河道工程设计中应尽量减少不必要的混凝土、能源和金属材料的消耗,增加天然低碳生态材料和本土植被的使用。

关键词: 温室气体;碳足迹;碳排放因子;生态河道;节能减排

中图分类号: X51;TU201.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0216-10

Quantitative Study and Evaluation on Carbon Footprint of Ecological Watercourse in Plain Water Network Area

YANG Zijie¹, ZHOU Binrong^{1,2}, WEI Jun³, ZHANG Yusheng¹, LI Ting¹, YU Laihui⁴, DING Dianyuan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. Yizheng Water Resources Bureau, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

3. Yangzhou Water Resources Bureau, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

4. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Jiangsu 310000, China)

Abstract: Under the background of ecological civilization construction, the construction of "dual carbon" proposes new requirements for the construction of ecological river channels. At present, there is still a lack of methods and standards to quantify carbon emissions in ecological river construction. According to the design characteristics of bank slope protection technology of ecological river channel engineering, based on the whole life cycle theory and using the carbon footprint emission coefficient method, this study focuses on four carbon footprint factors in the construction stage of ecological river channel: earthwork, concrete engineering, energy consumption and labor. The calculation results show that among different ecological river protection technologies, the carbon footprint emissions caused by concrete account for 34.75%~93.11%, with an average of 79.02%. Therefore, concrete is the most important carbon emission factor in ecological river engineering, followed by gasoline vehicle transportation and earthwork excavation. On the premise of satisfying the basic functions of bank slope, the bank slope protection technology of imitation wooden stake and grass planting has the best energy saving and emission reduction effect. Therefore, the unnecessary consumption of concrete, energy and metal materials should be minimized in the design of ecological river engineering, and the use of natural low-carbon ecological materials and native vegetation should be increased.

Keywords: greenhouse gas; carbon footprint; carbon emission factor; ecological river course; conserving energy-reducing emissions

在国家生态文明建设的背景下,生态岸坡防护工程以保障河道基本功能为前提,注重河道生态系统的生物多样性和可持续发展,发挥了滨岸带维持生态的重要功能。生态河道岸坡防护技术的选择多种多样,但是部分岸坡防护技术仍需消耗大量的化石能源和工程材料,具有高排放、高耗能的特点。目前已有生态河道的综合评价多以定性评价为主^[1-2],难以量化其生态效益。水利工程作为国民经济的重要组成部分,是碳排放的重要来源之一。如何立足水利工程设计和施工特点,选择合适的计算方法和工具,量化水利工程碳排放成为了亟待解决的重要问题^[3-5]。目前水利工程的碳排放量化和评价多集中在大型水利水电工程^[6-8],河道工程相关研究较少。生态河道工程碳排放评价标准和机制的尚欠缺,一定程度上限制了平原河网地区水利行业减排潜力的开发与技术进步。因此,如何针对生态河道工程的特点和实际情况,建立生态河道工程碳排放测算方法,进一步量化其生态效益;并从技术和管理出发,寻找河道工程建设过程中降耗减排的措施和方法,成为生态河道理论研究和生产实践的重要课题。

鉴于以上研究现状和存在问题,本文拟基于碳足迹和生命周期理论,在以下方面开展研究:(1)针对生态河道工程设计特点和生态河道建设材料的种类,比较并确定适合生态河道断面形式的量化单位;(2)分析不同生态河道断面形式碳排放要素的组成,明确生态河道工程的建设期碳足迹计算流程;(3)基于碳足迹建立不同生态河道断面形式的评价标准,实现生态河道设计过程的碳足迹比选,并分析筛选低碳减排的生态防护技术。

1 材料与方法

1.1 理论介绍

1.1.1 水利工程的生命周期

水利工程的生命周期延续性较强。根据生态河道不同阶段的特点,本文将生态河道生命周期分为工程设计、工程施工、工程运营维护和修复、工程拆除4个阶段。各自涵盖多项细分内容,其中工程设计阶段主要为可行性研究和施工图纸设计;工程施工阶段包括建材的生产及运输,河道清淤、地基处理、岸坡建设、种植植物等;工程运营维护和修复阶段包括建筑材料消耗和设备维护等;工程拆除阶段主要包括建筑物的拆除、建材二次回收利用、废弃物处理等^[9]。从全生命周期的角度来看,生态河道的

碳排放量表现在一次性能源消耗中,因此本文主要研究生态河道工程施工阶段的碳排放数量。

运用不同的政策评价工具可衡量低碳政策的有效性,以此来探寻低碳水利工程与社会经济具备的关系。依据碳足迹数据的获取途径将现有的计量方法分为三种:实测法、投入产出法和排放系数法^[10]。实测法是指在项目施工现场直接进行测量的方法,目前温室气体排放现场测定方法已经比较成熟^[11]。投入产出法运用了质量守恒定律的原理,即在生产过程中投入的原料和能源中的碳等于产出的碳。对于一个具体建筑工程项目,涉及的具体过程较多且变化复杂,需要对各个阶段都进行深入的分析 and 计算,限制了投入产出法计算水利和建筑工程碳足迹计量^[12]。排放系数法是指在满足相关的技术条件下,统计某产品在一定环境下生产过程中产生的碳排放,并对多个统计数值进行平均,将平均数作为基础数据进行碳排放量的计算^[13]。

1.1.2 碳足迹和碳排放因子

碳足迹由哥伦比亚大学的学者提出的“生态足迹”演变而来,是对建筑全生命周期碳排放的量化描述的主要参数^[14]。碳足迹的具体定义为:人类在生产和生活过程中直接或者间接产生的CO₂排放量,以此来描述碳足迹的运动过程^[15],即用碳足迹量化一个产品(工程)的碳排放数量。在此基础上,碳足迹可分为直接碳足迹和间接碳足迹^[7]。直接碳足迹表示直接消耗化石能源等产生的碳足迹,而间接碳足迹表示产品在生产、使用过程中所产生的碳足迹,并非直接排放的。目前,用于实际计量水利工程碳足迹的研究方法多处于理论模型研究阶段,大多数是以工程为样本,基于生命周期评价理论,提出了水利水电工程碳排放量的计算方法,对碳排放进行核算和分析,同时分析了工程的碳排放特点和减碳减排的措施^[16-17]。

“碳排放因子”概念来源于碳排放系数法中的“碳排放系数”。目前国际上已经有一套较为完整的排放因子数据库,应用较为方便^[18]。针对生态河道工程建设、运行和维护的特点,本研究将排放系数法的综合应用作为量化生态河道工程施工阶段碳足迹的主要方法。

1.2 生态河道的碳排放因子

本文的研究对象为生态河道相关工程,测算全生命周期中工程施工阶段直接与间接产生的温室气体的总质量,用二氧化碳当量定义工程碳足迹^[19]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)将碳排放系数

定义为:某一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量^[20],即:

$$E = M \cdot C_i$$

(1)

式中: E 表示碳排放量,kg; M 表示能源消耗量,百吨; C 表示碳排放系数,kg/ 百吨; i 表示能源类别。

一般情况下,通过分析工程施工过程中所涉及的温室气体排放来源,比如建筑材料、施工工序和施工机械等,筛选并确定碳排放因子。生态河道施工步骤主要包括围堰施工、降排水、清淤、土方开挖、混凝土施工、土方回填、绿化施工等工序。根据以上施工工序的特点和材料选择,进行碳排放因子的筛选和确定。生态河道主要从建设施工、原材料生产、原材料运输三个方面来确定碳排放因子(见图 1)。

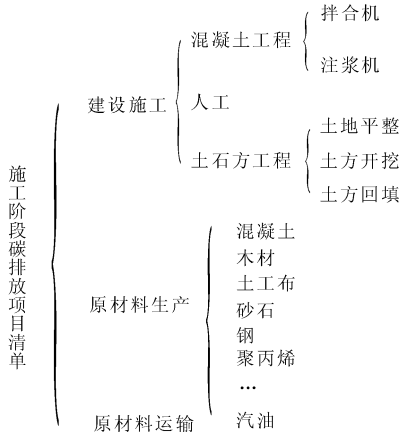


图 1 施工阶段碳排放项目清单

本研究基于碳排放因子筛选的准确性和简便性,围绕河道工程狭长的分布特点、施工工序和已有生态防护技术,重点考虑了土方工程、混凝土、能源和人工四大碳足迹排放因子。通过分析不同岸坡防护技术的材料和工艺特点,筛选和确定碳排放因子(见表 1)。

根据生态河道岸坡防护技术是否包括混凝土施工,以及混凝土施工的方法(预制或现场浇筑),将生态河道岸坡归纳总结为土质岸坡、现浇混凝土岸坡、预制块(砖)岸坡、格宾网岸坡和复合岸坡五类。在五类岸坡的基础上,根据施工工艺、机械和材料,细化岸坡防护技术的归类(见表 2)。

1.3 生态河道碳排放因子分类

影响生态河道工程碳足迹的因素众多,如何在众多因素中选择合适的时空范围尺度成为首要解决的问题。基于对河道断面形式和建筑材料类型的分析,笔者发现生态河道工程材料和结构主要包括以下 3 种布置形式:

表 1 碳排放因子清单

碳排放来源	碳排放因子名称	碳排放因子数值	参考文献
A 土石方工程	平整土地 A1/(kg · m ⁻³)	0.023	[21]
	土方开挖 A2/(kg · m ⁻³)	1.086	[21]
	土方回填 A3/(kg · m ⁻³)	0.128	[21]
B 建筑材料	混凝土砌块 B1/(kg · m ⁻³)	146	[22]
	C20 混凝土/(kg · m ⁻³)	201.38	[22]
	C25 混凝土 B2/(kg · m ⁻³)	250.54	[22]
	土工布 B3/(kg · m ⁻³)	0.16	[23]
	钢 B4/(kg · t ⁻¹)	1789.06	[22]
	木材 B5/(kg · m ⁻³)	10.45	[22]
	铜 B6/(kg · t ⁻¹)	10870	[22]
C 运输	聚丙烯 B7/(kg · kg ⁻¹)	0.6114	[24]
	汽油车运输 C1/(kg · 百吨 ⁻¹ · km ⁻¹)	14.21	[22]
D 施工机械设备	拌合机 D1/(kg · 台班 ⁻¹)	10.3	[22]
	注浆机 D1/(kg · 台班 ⁻¹)	16.72	[22]
E 下垫面	砂石垫层 E1/(kg · m ⁻³)	8.76	[22]
F 绿化	草坪生长期排放 F1/(kg · m ⁻³)		
	树木生长期排放 F2/(kg · kg ⁻¹)	0.491	[25]
G 人工	人工 G1/(kg · d ⁻¹)	0.73	[21]

(1)点状布置。主要为灌木植物、乔木植物、台阶、景观小品等。

(2)平面布置。主要包括土工布、土工格栅、草皮绿化、土地平整。

(3)立体布置,主要包括现浇混凝土、土方开挖、土方回填、河道清淤等。

本研究中,点状布置主要考虑乔灌木植物,平面布置主要考虑土工布、土工格栅和草皮绿化;立体布置主要考虑现浇混凝土、土方开挖、土方回填、钢、木材和砂石垫层。

1.4 工程量计算

生态河道工程量计算主要包括两种计算方法,即存在沿河道纵向方向的长度计算方法和沿河道横向方向的面积计算方法。当按照沿河道纵向方向的长度计算工程量时,其优势在于便于比较整个河道工程不同断面形式下碳足迹的数量,其劣势在于未能考虑河道横断面的具体设计。河道横向方向的面积计算工程量可以量化不同断面设计本身的碳足迹,但是该方法对于整个河道工程碳足迹的计算较为复杂。本研究中由于各种岸坡防护技术的横截面不一样,如果单以河道横向方向的面积为基本单位,不同河道断面设计无法进行有效比较,因此本文河道断面尺寸满足工程要求的情况下,在选择以沿河

道纵向方向的长度 100 m 为计算单位量化碳足迹。

表 2 生态岸坡防护技术分类

序号	生态岸坡分类	具体类型	主要碳排放因子
1	土质岸坡	1.1 自然岸坡防护技术	混凝土 B2
		1.2 人工植草岸坡防护技术	木材 B5
		1.3 木桩 + 植草岸坡防护技术	汽油车运输 C1
		1.4 植入型生态固滩岸坡防护技术 ^[26]	土方开挖 A2
		1.5 十字块压护大网格土工格栅岸坡防护技术 ^[27]	
2	现浇混凝土岸坡	2.1 植生混凝土岸坡防护技术	混凝土 B2
		2.2 硬质岸坡防护技术(混凝土)	混凝土砌块 B1
		2.3 硬质岸坡防护技术(浆砌石)	木材 B5
		2.4 生态混凝土现浇网格岸坡防护技术 ^[28]	汽油车运输 C1
		2.5 宽缝加筋生态混凝土岸坡防护技术 ^[29]	土方开挖 A2
3	预制块(砖)岸坡	3.1 混凝土砌块岸坡防护技术	混凝土 B2
		3.2 链锁块岸坡防护技术	混凝土砌块 B1
		3.3 生态植草砖岸坡防护技术	木材 B5
		3.4 六方砖岸坡防护技术	汽油车运输 C1
		3.5 六方空心砖岸坡防护技术	土方开挖 A2
		3.6 自嵌式挡土墙植生岸坡防护技术 ^[30]	土方回填 A3
4	格宾网岸坡	4.1 格宾网挡墙岸坡防护技术	混凝土 B2
		4.2 格宾网护坡岸坡防护技术	块石 E1
		4.3 网笼式岸坡防护技术 ^[31]	汽油车运输 C1
5	复合岸坡	5.1 舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术	聚丙烯 B7
		5.2 一级斜墙式岸坡防护技术 ^[32]	混凝土 B2
		5.3 两级台阶 + 斜坡式岸坡防护技术 ^[32]	混凝土砌块 B1

1.5 碳排放量计算过程

(1) 初步设计,绘制各类型生态河道岸坡防护技术的断面图,由所绘制 CAD 图纸确定所涉及的碳排放因子,在计算概预算的同时确定了相应的工程量。

(2) 收集所需碳排放因子,确定数值、单位、类型,分类集中在因子库中,便于下次的提取与使用。

(3) 基于碳排放因子的数值以及相应的工程量,输入公式得各项碳排放量以及总碳排放量。

2 实际工程案例

2.1 工程概况

为了检验生命周期碳排放因子的实用性,探索生态河道工程的碳排放规律并制定减排策略,本研究以红旗圩中心河河道综合整治工程为例进行碳足迹的计算。红旗圩中心河河道综合整治工程位于常州市金坛区朱林镇红旗圩村(见图 2)。所在区域属太湖流域湖西地区,位于长江下游冲积平原的太湖湖西平原,是典型的平原水网地区。该河道贯穿于红旗圩北片圩区,整体呈南北走向,全长 1.15 km。河道经多年运行淤积严重,岸坡水土流失严重,河道引水蓄水受到很大影响,淤积严重,制约了圩区内农业生产和村民生活需求。对朱林镇红旗圩中心河河道实施整治是十分迫切且必要的。

2.2 河道断面设计

本工程中拟采用生态岸坡防护技术,通过比选发现 6 种岸坡防护技术满足河道基本功能要求,包括链锁块岸坡防护技术(见图 3(a))、舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术(见图 3(b))、生态格网石笼挡墙岸坡防护技术(见图 3(c))、木桩 + 植草岸坡防护技术(见图 3(d))、混凝土砌块岸坡防护技术(见图 3(e))和生态植草砖岸坡防护技术(见图 3(f))。

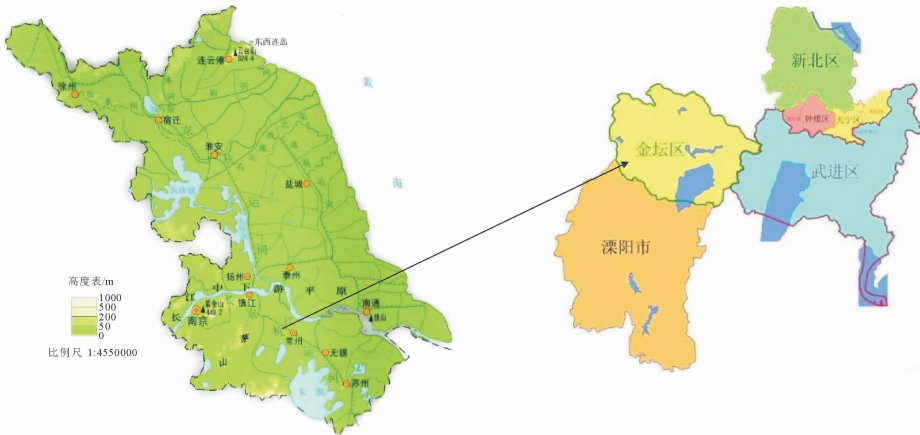


图 2 项目区位置图

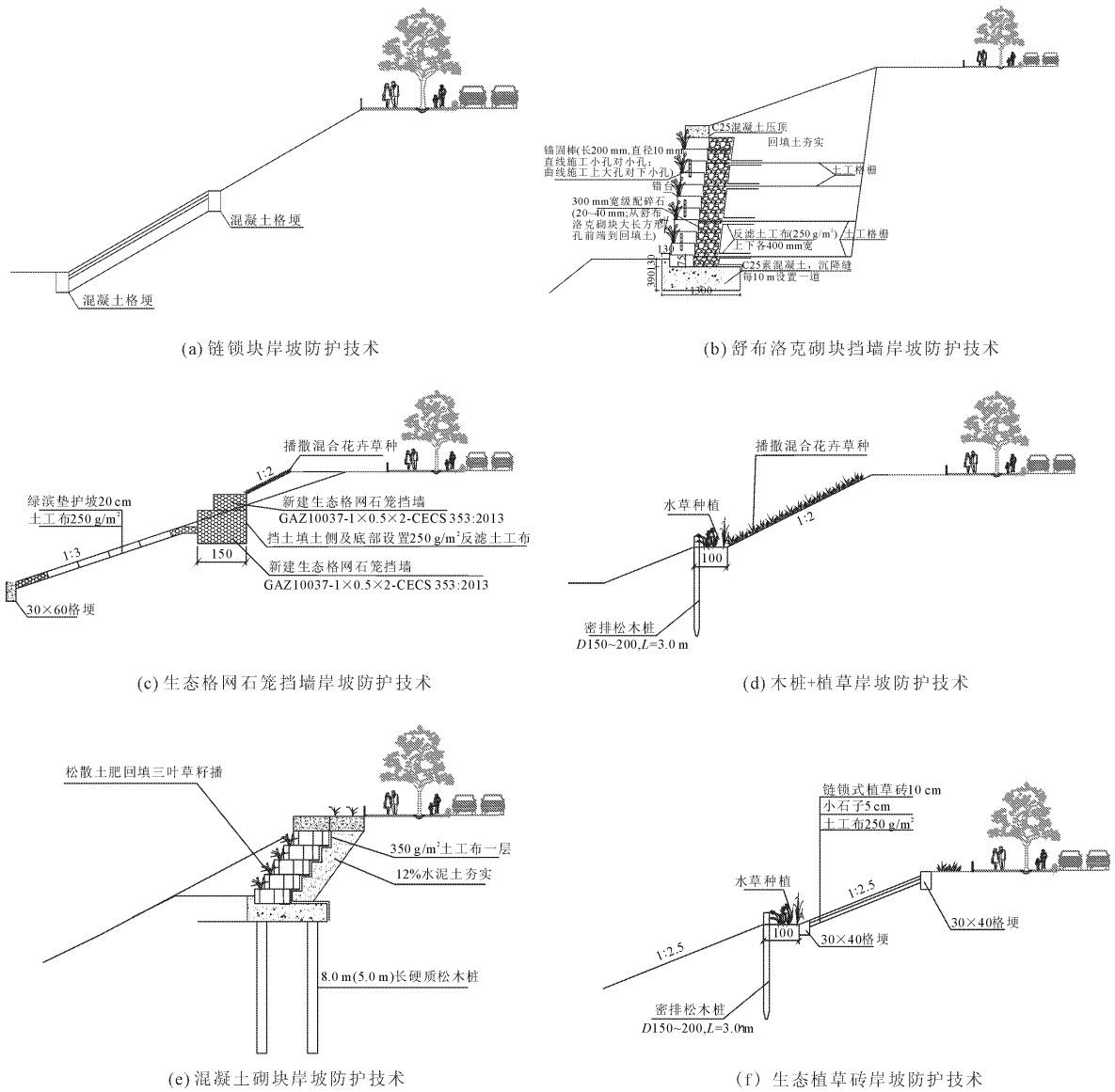


图 3 岸坡防护技术示意图

根据工程项目初步设计和概算等相关材料,对 6 种岸坡防护技术计算单位长度(100 m)工程量,筛选碳排放因子,确定碳排放系数,估算不同岸坡防护技术的碳足迹,并对各个碳排放因子进行分析比较,分析确定影响生态岸坡防护技术碳足迹的关键因子。

2.3 数据计算与分析

采用 CAD 来绘制岸坡防护示意图,采用 Microsoft visio 来绘制施工阶段碳排放项目清单,采用 Power Point 演示文稿来绘制项目区位置图,采用 Excel 来进行数据的计算与分析。

3 结果与分析

3.1 工程量计算结果汇总

红旗圩中心河道整治工程中,分析 6 种类型的

生态岸坡防护技术工程量计算结果发现(见表 3),在土石方工程中,链锁块岸坡防护技术平整土地的工程量最小,原因可能为链锁块岸坡防护技术的横断面宽度相对较小。对比土方开挖的工程量发现,生态植草砖岸坡防护技术和木桩 + 植草岸坡防护技术较少,而混凝土砌块岸坡防护技术最大。对比土方回填的工程量发现,混凝土砌块岸坡防护技术和舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术土方回填量远大于其他类型的岸坡防护技术。

在建筑材料中,由于生态格网石笼挡墙岸坡防护技术和木桩 + 植草岸坡防护技术几乎未涉及混凝土砌块工程量,因而其工程量最小。混凝土砌块岸坡防护技术对混凝土砌块的需求最多。对比现浇混凝土的工程量发现,由于现浇混凝土底部素混凝土

垫层远远大于其他类型的岸坡防护技术,混凝土砌块岸坡防护技术和舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术的所需现浇混凝土量比较大。

对于土工布,链锁块岸坡防护技术的需求量最大,混凝土砌块岸坡防护技术和生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的需求量约为 525 m² 左右,生态植草砖岸坡防护技术和舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术的需求量约为 265 m² 左右,均小于链锁块岸坡防护技术的需求量,木桩 + 植草岸坡防护技术无需使用土工布。

对比钢的工程量发现,生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的铅丝笼以及舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术的锚固棒需要用到钢,生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的钢材量最大;对比木材的工程量发现,混凝土砌块岸坡防护技术、木桩 + 植草岸坡防护技术和生态植草砖岸坡防护技术需要打入木桩,其中混凝土砌块岸坡防护技术的木桩长于其余两种类型,对木材的需求量也最大;对比聚丙烯的工程量发现,舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术需要铺设土工格

栅,对原材料聚丙烯的需求较大。

对比汽油的耗用量发现,生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的块石需求多以及混凝土砌块岸坡防护技术的混凝土砌块的需求多,导致总质量远大于其余类型的岸坡防护技术,运输消耗的汽油量也多于其余类型。在施工机械设备中,对比机械的工程量发现,由于各种类型的岸坡防护技术都需要现浇混凝土,都需要拌合机和注浆机,因此采取相同类型的工程量进行计算。在下垫面工程中,对比砂石的工程量发现,生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的块石需求量远大于其余类型且差距明显。

在绿化工程中,对比草坪的工程量发现,舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术的草坪种植面积最大,木桩 + 植草岸坡防护技术次之,生态格网石笼挡墙岸坡防护技术的草坪种植面积最小;对比树木的工程量发现,舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术和混凝土砌块岸坡防护技术都需要种植树木且工程量相等。对比人工的工程量发现,同一工程都需要使用人工参与,人工的需求量相等,工程量为统一值。

表 3 六种生态河道岸坡防护技术工程量计算表

碳排放来源	碳排放因子名称	生态河道防护技术类别					
		生态植草砖岸坡防护技术	生态格网石笼挡墙岸坡防护技术	木桩 + 植草岸坡防护技术	混凝土砌块岸坡防护技术	舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术	链锁块岸坡防护技术
A 土石方工程	平整土地 A1/m ³	290.0	290.0	290.0	290.0	290.0	134.0
	土方开挖 A2/m ³	90.2	672.0	106.1	2835.0	740.0	520.0
	土方回填 A3/m ³	—	186.5	—	2403.0	1700.0	110.0
B 建筑材料	混凝土砌块 B1/m ³	28.1	—	—	156.0	60.3	67.0
	C25 混凝土 B2/m ³	48.0	36.0	11.9	96.0	121.2	48.0
	土工布 B3/m ²	281.2	540.9	—	512.0	253.9	670.0
	钢 B4/t	—	4.3	—	—	0.6	—
	木材 B5/m ³	94.2	—	94.2	351.7	—	—
	聚丙烯 B7/kg	—	—	—	—	2500.0	—
C 运输工程	汽油车运输 C1/(百吨 · km)	27.9	195.4	10.4	144.5	55.4	32.6
D 施工机械设备	拌合机 D1/台班	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	注浆机 D1/台班	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
E 下垫面工程	砂石垫层 E1/m ³	14.1	636.0	—	—	41.9	33.5
F 绿化	草坪生长期排放 F1	830.0	492.0	953.0	600.0	1320.0	604.0
	树木生长期排放 F2/kg	—	—	—	299.0	299.0	—
G 人工	人工 G1/人	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

3.2 碳排放量计算结果汇总

6 种类型的岸坡防护技术的碳排放量计算结果见表 4。结果表明碳排放最少的三个岸坡防护技术分别为木桩 + 植草岸坡防护技术(图 3(d))、生态

植草砖岸坡防护技术(图 3(f))和链锁块岸坡防护技术(图 3(a)),碳排放最多的是混凝土砌块岸坡防护技术(图 3(b))。

6 种类型的岸坡防护技术的各项碳排放量所占

百分比见表 5。

表 4 六种生态河道岸坡防护技术碳排放量汇总表							单位:kg
碳排放来源	碳排放因子名称	生态河道防护技术类别					
		生态植草砖岸坡防护技术	生态格网石笼挡墙岸坡防护技术	木桩 + 植草岸坡防护技术	混凝土砌块岸坡防护技术	舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术	连锁块岸坡防护技术
A 土石方工程	平整土地 A1	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	3.1
	土方开挖 A2	97.9	729.8	115.2	3078.8	803.6	564.7
	土方回填 A3	—	23.9	—	307.6	217.6	119.5
B 建筑材料	混凝土砌块 B1	4105.5	—	—	22776.0	8805.3	9781.6
	C25 混凝土 B2	12025.9	9019.4	2978.9	24051.8	30364.1	12018.4
	土工布 B3	45.0	86.5	—	81.9	40.6	107.2
	钢 B4	—	7680.4	—	—	1129.3	—
	木材 B5	984.4	—	984.4	3675.1	—	—
	聚丙烯 B7	—	—	—	—	1528.5	—
C 运输工程	汽油车运输 C1	503.8	2777.1	147.6	2053.9	786.9	463.7
D 施工机械设备	拌合机 D1	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
	注浆机 D1	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4	33.4
E 下垫面工程	砂石垫层 E1	123.2	5571.4	—	—	367.3	293.4
F 绿化	草坪生长期排放 F1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	树木生长期排放 F2	—	—	—	146.8	146.8	—
G 人工	人工 G1	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
Σ		17846.7	25956.5	4294.2	56239.9	44258	23413.0

表 5 六种生态河道岸坡防护技术中各项碳排放量占总排放量的百分比							单位:%
碳排放来源	碳排放因子名称	生态河道防护技术类别					
		生态植草砖岸坡防护技术	生态格网石笼挡墙岸坡防护技术	木桩 + 植草岸坡防护技术	混凝土砌块岸坡防护技术	舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术	连锁块岸坡防护技术
A 土石方工程	平整土地 A1	0.038	0.026	0.156	0.012	0.015	0.013
	土方开挖 A2	0.549	2.812	2.683	5.474	1.816	2.412
	土方回填 A3	—	0.092	—	0.547	0.492	0.51
B 建筑材料	混凝土砌块 B1	23.004	—	—	40.498	19.895	41.778
	C25 混凝土 B2	67.384	34.748	69.370	42.766	68.607	51.332
	土工布 B3	0.252	0.333	—	0.146	0.092	0.458
	钢 B4	—	29.59	—	—	2.552	—
	木材 B5	5.516	—	22.924	6.535	—	—
	聚丙烯 B7	—	—	—	—	3.454	—
C 运输工程	汽油车运输 C1	2.823	10.699	3.437	3.652	1.778	1.981
D 施工机械设备	拌合机 D1	0.115	0.079	0.480	0.037	0.047	0.088
	注浆机 D1	0.187	0.129	0.778	0.059	0.075	0.143
E 下垫面工程	砂石垫层 E1	0.690	21.464	—	—	0.830	1.253
F 绿化	草坪生长期排放 F1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	树木生长期排放 F2	—	—	—	0.261	0.332	—
G 人工	人工 G1	0.041	0.028	0.170	0.013	0.016	0.031

结果表明,平整土地的占比范围为 0.012%~0.156%,土方开挖的占比范围为 0.549%~5.474%,土方回填的占比范围为 0.092%~0.547%,现浇混凝土的占比范围为 34.748%~69.370%,混凝土砌

块的占比范围为 19.895%~41.778%,聚丙烯的占比为 3.454%,钢的占比范围为 2.552%~29.590%,木材的占比范围为 5.516%~22.924%,土工布的占比范围为 0.092%~0.458%,砂石垫层的占比范围为 0.690%~21.464%,汽油车运输的占比范围为 1.778%~10.699%,拌合机的占比范围为 0.037%~0.480%,注浆机的占比范围为 0.059%~0.778%,

树木生长期排放的占比范围为 0.261%~0.332%,人工的占比范围为 0.013%~0.170%。部分碳排放因子会对工程的总碳排放量产生较大影响,单项防护技术中碳排放量占比超过 10% 的碳排放因子包括现浇混凝土、混凝土砌块、钢材、木材、汽油车运输和砂石垫层;根据碳排放因子碳排放量所占比重,混凝土及其预制砌块(表 6)。

表 6 六种生态河道岸坡防护技术中影响最大的五种碳排放因子排序表

生态河道防护技术类别	生态植草砖岸坡防护技术	生态格网石笼挡墙岸坡防护技术	木桩+植草岸坡防护技术	混凝土砌块岸坡防护技术	舒布洛克砌块挡墙岸坡防护技术	链锁块岸坡防护技术
碳排放因子名称	C25 混凝土 B2	C25 混凝土 B2	C25 混凝土 B2	C25 混凝土 B2	C25 混凝土 B2	C25 混凝土 B2
	混凝土砌块 B1	砂石垫层 E1	木材 B5	混凝土砌块 B1	混凝土砌块 B1	混凝土砌块 B1
	木材 B5	汽油车运输 C1	汽油车运输 C1	木材 B5	钢 B4	土方开挖 A2
	汽油车运输 C1	土方开挖 A2	土方开挖 A2	汽油车运输 C1	土方开挖 A2	汽油车运输 C1
	砂石垫层 E1	土工布 B3	注浆机 D1	土方开挖 A2	汽油车运输 C1	砂石垫层 E1

4 讨 论

4.1 生态河道防护技术碳足迹的特点

生态河道工程不同阶段的碳足迹排放趋势不同。根据水利工程碳排放的阶段特点,可将水利工程生命周期划分为施工阶段、运行管理阶段、维护改造阶段和拆除阶段^[33]。在施工阶段,由于不同水利工程水文地质条件、地理位置、交通条件,以及工程级别和工程量等因素影响,施工组织设计方案均不相同。对于平原地区生态河道工程,可以通过其具体的设计和施工方案,分析设计方案之间河道平面设计和断面设计的特点,量化不同生态河道工程设计方案中施工阶段碳足迹。

相比传统岸坡工程,生态河道工程改变了具有阻渗作用的硬质岸坡,采用预制砌块、格宾网和木桩等透水结构;通过种植乔木、灌木和草类等植被,利用其根系锚固作用和冠层水文效应,固定岸坡,保持水土,构建良好的岸坡生境,增加河道岸坡生物多样性^[34]。经过研究发现:在相同规格的工程中,木桩+植草岸坡防护技术碳足迹最少,主要原因为植草面积大,利用其生物功能作用已经能够满足河道固土护坡的作用,进而减少了混凝土等材料的使用,降低了碳足迹排放。

乔木、灌木和草类植被可以吸收固定 CO₂ 等温室气体^[35-36]。当采用植草岸坡防护技术,建成的生态河道工程随着工程运行时间的持续,固碳作用越来越显著,起到了碳汇作用。从碳足迹方面考虑,生态岸坡防护技术的推广利用,一方面可以适当减少

生态河道工程施工阶段碳足迹的排放;另一方面在工程运行和维护阶段,可以有效发挥碳汇的作用。因此,生态岸坡防护技术具有显著的生态性和可持续性。此外,目前生态河道的综合评价多以定性评价为主^[1-2],难以实现生态效益的具体量化。本文通过碳足迹的估算,在一定程度上实现了生态效益的定量比较,为生态河道不同设计方案的比选提供了较好的借鉴。

4.2 生态河道碳足迹排放因子

相较其他阶段,工程施工阶段碳排放最为集中,可将其进一步细化为原材料开采生产阶段、材料运输阶段和主体施工阶段。碳排放的来源主要包括施工机具运行、施工现场管理、办公活动等产生的能耗,其中施工机具运行产生的能耗是碳排放的主要来源之一。本文研究发现造成生态岸坡防护技术的碳足迹变化的原因主要是建筑材料种类和数量之间的差异。所研究 6 种生态河道防护技术中,混凝土及其砌块引起的碳足迹排放占比达 34.75%~93.11%,平均占比达 79.02%,表明混凝土材料的施工是生态河道工程最主要的排放因子,其次是汽油车运输和土方开挖。因此,在设计工程中,应优先合理化设计护坡断面,减少挖填方量,减少机械能耗,并尽量减少各种金属和化工等工程材料的使用;在施工过程中,应优化布置施工道路,合理搭配机械设备,以实现节能减排。

4.3 研究中存在的不足与展望

由于受到工程案例的限制,本文未详细考虑预制块的大小和重量。预制块单块重量变化较大,最

高可达到 $50 \text{ kg}^{[37]}$, 人工无法完成搬运和安装施工, 需要吊装机械安装施工, 这样可能导致碳排放量因子的选取产生偏差, 使得碳足迹量化也存在较大误差。后续研究可设置一个重量系数, 将生态砌块的安装工程分成人工和机械两种方式, 使得碳足迹计算更加精确。此外, 由于河道地理位置、水文条件等特殊性, 本文尚未考虑河道的清淤疏浚措施、初期排水、经常性排水措施, 以及相应的水保措施。

河岸带作为陆地与水体的交错区域, 是水陆物质、信息、能量循环流通和交换的关键地带。与国内河道设计相比, 国外大量采用土壤生物工程, 利用棕榈、柳枝等低碳天然生态材料和本土植被应用于河道工程; 在满足岸坡功能的前提下, 就地取材, 通过柴捆、木桩、植生毯和扦插植物等生态材料稳定岸坡^[38-40]。从碳排放因子考虑, 土壤生物工程摒弃了传统工程材料混凝土, 有效减少了碳排放数量; 从施工过程角度, 土壤生物工程多采用人工和小型机械, 有效减少了机械和能源消耗; 在运行和维护阶段, 本土植物的生长有效地固土护坡、防治水土流失, 并且充分发挥了植物截流纳污、固碳减排的作用。因此, 土壤生物工程为生态河道提供了较好的技术参考。

前人把“碳中和”概念延用到其他的主要温室气体(例如甲烷、氧化亚氮等), 并进而提出“温室气体净零排放”(net zero GHGs emission)或“气候中和”(climate neutrality)等概念^[41]。生态岸坡防护技术中植物防护的应用, 使得生态河道工程在工程运行和维护阶段具有碳汇作用。工程长期运行下, 该作用能否实现“碳中和”, 在工程量(碳足迹)一定的情况下, 实现碳中和的运行时间阈值(年限)是多少, 以及如何优化工程设计以缩短达到“碳中和”的所需时间均需进一步探讨。

5 结 论

(1) 基于碳排放因子筛选的准确性和简便性, 根据生态河道岸坡防护技术是否包括混凝土施工, 以及混凝土施工的方法(预制或现场浇筑), 将生态河道岸坡归纳总结为土质岸坡、现浇混凝土岸坡、预制块(砖)岸坡、格宾网岸坡和复合岸坡五类。

(2) 基于对河道断面形式和建筑材料类型的分析, 生态河道工程材料和结构主要可以分成点状布置、平面布置、立体布置 3 种形式。

(3) 六种常见的生态河道防护技术中, 混凝土引起的碳足迹排放占比达 $34.75\% \sim 93.11\%$, 平均占比达 79.02% , 因而混凝土为生态河道工程最主

要的排放因子, 其次是汽油车运输和土方开挖。

(4) 单从碳足迹角度考虑, 仿木桩+植草岸坡防护技术是最符合节能减排政策的。因此, 在满足岸坡功能的前提下, 生态河道工程设计中应尽量减少不必要混凝土、金属材料、化工合成材料的使用, 增加天然低碳生态材料和本土植被的设计。

参考文献:

- [1] 范庭庭. 生态河道治理模式及其评价方法[J]. 四川水泥, 2018(3): 137.
- [2] 胡孟春. 城市多自然河道评价指标体系与评价方法——以镇江古运河为例[C]//中国环境科学学会. 2007 中国环境科学学会学术年会优秀论文集(上卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [3] 汤勇生, 张智通, 汪永禄. 碳中和目标下零碳水利风景区建设与发展路径[J]. 水利经济, 2022, 40(2): 74-78, 90.
- [4] 王 鼎, 赵钟楠, 邢子强, 等. 碳达峰碳中和背景下水利工作的思考[J]. 水利规划与设计, 2022(3): 11-14, 112.
- [5] 曹培红. 百威英博:“水利方”要做“碳排放”[J]. 社会与公益, 2015(7): 60-61.
- [6] 张社荣, 庞博慧. 基于碳足迹理论的大型水电枢纽工程环境排放分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 170-176.
- [7] 黄跃群, 刘耀儒, 许文彬, 等. 水利水电工程全生命周期碳排放研究——以犬木塘工程为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8): 1366-1373.
- [8] 夏 欣, 钟 权. 水电站生命周期温室气体排放研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 188-192, 198.
- [9] 杨 勇. 全生命周期理念下的建筑碳排放测算方法[J]. 北方建筑, 2022, 7(4): 21-25.
- [10] Roger Fay, Graham Treloar, Usha Iyer-Raniga. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study[J]. Building Research & Information, 2000, 28(1): 31-41.
- [11] 邓焕广, 张智博, 刘 涛, 等. 城市河岸带绿地 N_2O 和 CH_4 排放对硝态氮输入的短期响应研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 97-104.
- [12] 纪颖波, 张 祺, 朱发东. 基于 Process-Based LCA 方法的我国装配式住宅物化阶段碳排放计算模型研究[J]. 工程管理学报, 2017, 31(4): 23-28.
- [13] Bo P Weidema, Mikkel Throne, Per Christensen, et al. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment?[J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(1): 3-6.
- [14] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint'[J]. Journal of the Royal Society of Medicine, 2009, 92(4): 193-195.
- [15] 包昀培. 基于 BIM 的建筑物碳足迹评价研究[D]. 大

- 连:大连理工大学,2016.
- [16] 赵荣钦,杨文杰,马林,等. 华北水利水电大学碳足迹核算及减排潜力分析[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(4):112-116.
- [17] 曹馨匀,刘猛,黄春雨. 低碳建筑评价指标体系[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(S2):26-28.
- [18] 官永健. 基于工程量清单的装配式建筑物化阶段碳排放测算研究[D]. 广州:广州大学,2020.
- [19] 张社荣,庞博慧. 基于碳足迹理论的大型水电枢纽工程环境排放分析[J]. 水力发电学报,2015,34(4):170-176.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. In: Agriculture, forestry, and other land use, vol. 4 [R]. 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- [21] 陈冲. 基于LCA的建筑碳排放控制与预测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [22] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京:东南大学,2015.
- [23] 建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [24] 张楚珂,田涛,王之茵,等. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. 石油石化绿色低碳,2021,6(6):17-23.
- [25] 胡耀华,李绍鹏,陈友兴,等. 橡胶树群体呼吸作用研究 II. 估算一株树各个器官呼吸总量的数学模型[J]. 热带作物学报,1983(1):57-66.
- [26] 李明. 河流心滩守护中的生态固滩方法研究——以长江倒口窑心滩植入型生态固滩工程为例[J]. 中国农村水利水电,2018(7):78-83.
- [27] 曹民雄,申霞,应翰海. 长江南京以下深水航道生态型整治建筑物结构研究[J]. 水运工程,2018(1):1-11.
- [28] 李凌云,野博超,刘心愿. 河道生态护坡技术研究现状[J]. 水运工程,2022(7):205-210,245.
- [29] 何广水,姚仕明. 宽缝加筋生态混凝土河岸护坡技术开发应用[C]//黄河水利委员会. 第四届全国河道治理与生态修复技术交流研讨会论文集,郑州:黄河水利委员会,2012.
- [30] 卜自珍,焦梦妮,马学冬,等. 自嵌式挡土墙在小型河道护岸工程中的应用[J]. 北京水务,2014(1):35-38.
- [31] 姚仕明,岳红艳. 长江中下游生态护岸工程发展趋势浅析[J]. 中国水利,2012(6):18-21.
- [32] 水利工程生态护岸设计规程:T/GDHES 001—2022. [S]. 广东:广东省水利学会,2022.
- [33] 袁荣丽. 基于BIM的建筑物化碳足迹计算模型研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [34] 穆奎,潘伟良,王利彬,等. 生态河道植物护坡工程技术研究现状与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):206-216.
- [35] 李韶山. 高等植物光合作用固定二氧化碳的方式[J]. 生物学教学,1992(1):33-34.
- [36] 刘可心. 二氧化碳生物固定的研究进展[J]. 中国高新科技,2018(2):12-14.
- [37] 陈振聪. 生态砖及其在水利工程中的应用[J]. 工业设计,2016(5):169,171.
- [38] Sangalli P, Fernandes J P, Tardío G. Soil and water bioengineering as natural based solutions [J]. Urban Services to Ecosystems, 2021:317-332.
- [39] Maxwald Melanie, Crocetti Cesare, Ferrari Roberto, et al. Soil and water bioengineering applications in Central and South America: a transferability analysis [J]. Sustainability, 2020,12(24):10505.
- [40] Preti Federico, Capobianco Vittoria, Sangalli Paola. Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions [J]. Ecological Engineering, 2022,181:106687.
- [41] IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5°C [M]. UK: Cambridge University Press, 2018.