淮河流域平原洼地治理工程的碳效应

张玉瑞[1], 赵 莹[2], 徐向舟[1], 侯祥东[3]

(1.大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 3.山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100)

摘 要: [目的] 明晰双碳背景下淮河流域平原洼地治理工程的多维度碳效应,为区域减排增汇及可持续发展提供理论依据与技术支撑。[方法] 以山东省淮河流域沿运片邳苍郯新片区洼地治理工程为研究对象,结合碳排放系数法、生态系统类型法等方法,对工程施工阶段、土地利用结构、水土保持措施及农业生产4个维度进行碳效应量化分析。[结果] ①治理工程施工中材料消耗碳排放量最高,需将其作为重点减排对象。施工阶段总碳排放量为4.96×10^5 t,材料消耗碳排放量约占72%。因此,严格控制工程材料的消耗量,能够有效降低治理工程施工期的碳排放量。②研究区2020—2023年土地利用总碳储量变化以耕地和林地碳储量减少以及水域碳储量显著增加为主。主要表现为耕地和林地碳储量减少了2.99×10^4 t,水域碳储量增加了2.23×10^4 t。总碳储量减少了2%,部分耕地和林地面积转变为水域面积是碳储量减少的主导因素。③水土保持措施和农业生产均表现为长期碳汇效应,且以农业生产碳汇效应为主。其中水土保持措施碳汇量增加了356.95 t,农业生产净碳汇量增加了1.54×10^5 t,抵消了工程施工造成的碳排放量的30%以上。[结论] 淮河流域平原洼地治理工程区域在短期内总体呈现碳排放效应,后续可通过绿色工程管理、生态修复以及农业低碳发展等措施实现"减碳"与"增汇"的有机结合。

关键词: 碳效应; 水土保持; 量化分析; 减排增汇; 平原洼地; 淮河流域

文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0214-09 **中图分类号:** X171.1, TV213.4

文献参数: 张玉瑞, 赵莹, 徐向舟, 等.淮河流域平原洼地治理工程的碳效应[J].水土保持通报,2026,46(3):214-222. Zhang Yurui, Zhao Ying, Xu Xiangzhou, et al. Carbon effects on governance projects in plain depression of Huaihe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):214-222.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.033 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.033**

Carbon effects on governance projects in plain depression of Huaihe River basin

Zhang Yurui[1], Zhao Ying[2], Xu Xiangzhou[1], Hou Xiangdong[3]

(1.*School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning* 116024, *China*; 2.*Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong* 250013, *China*; 3.*Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan, Shandong* 250100, *China*)

Abstract: [Objective] The multidimensional carbon effects of governance projects in plain depression of the Huaihe River basin under the dual carbon goals were investigated in order to provide a theoretical basis and technical support for regional emission reduction, carbon sequestration, and sustainable development. [Methods] The governance projects in plain depression of the Canal Zone and Pi-Cang-Tan-Xin Region in the Huaihe River basin of Shandong Province were taken as a research object, and methods including the carbon emission coefficient method, ecosystem classification method, and other relevant approaches were used to quantitatively analyze the carbon effects from four dimensions: the engineering construction stage, land use structure, soil and water conservation measures, and agricultural production. [Results] ① Material consumption accounted for the highest carbon emissions during construction and should be a key target for emission reduction. The total carbon emissions

收稿日期:2025-09-26 **修回日期:**2025-12-27 **采用日期:**2026-01-04

资助项目:山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心项目"山东省淮河流域重点平原洼地沿运片邳苍郯新片区治理工程科学研究试验"(HHLY-YYPCTX-KY2024)

第一作者:张玉瑞(2001—),女(汉族),河南省洛阳市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。Email:zhangyrui01@163.com。

通信作者:徐向舟(1969—),男(汉族),浙江省龙游县人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事水土保持与可持续发展方面的研究。Email:xzxu@dlut.edu.cn。

赵莹(1979—),女(汉族),辽宁省凌海市人,教授级高级工程师,主要从事生态环境、水土流失防治等方面的研究。Email:411980361@qq.com。

during the period of construction were 4.96×10^5 tons, approximately 72% of which was attributed to material consumption. Hence, strictly controlling material consumption effectively reduced the carbon emissions generated in the construction phase. ② From 2020 to 2023, changes in total carbon storage in the study area were mainly characterized by decreases in cultivated land and woodland, and a significant increase in water bodies. Specifically, the carbon storage of cultivated land and woodland decreased by 2.99×10^4 tons, while that of water bodies increased by 2.23×10^4 tons, resulting in a 2% reduction in the total carbon storage. The transformation of a portion of cultivated land and woodland into water bodies was the key factor in reducing the carbon storage. ③ Soil and water conservation practices and agricultural production both exhibited a long-term carbon sink effect, with agricultural production as the dominant contributor. The carbon sink of soil and water conservation practices increased by 356.95 tons and the net carbon sink of agricultural production increased by 1.54×10^5 tons, which offset more than 30% of the carbon emissions generated during construction. [Conclusion] The project area shows an overall carbon emission effect in the short term, and subsequently, the combination of carbon reduction and carbon sequestration can be achieved through measures such as green engineering management, ecological restoration and low-carbon development in agriculture.

Keywords: carbon effect; soil and water conservation; quantitative analysis; carbon-emission reduction and carbon-sink enhancement; plain depression; Huaihe River basin

在全球气候治理深入推进及低碳转型的背景下,工程建设领域的能源消耗与温室气体排放量巨大,是该领域的主要环境影响之一。因此其减排压力与转型需求日益凸显。洼地治理工程作为区域性水利工程,主要是针对低洼易涝地区的防洪排涝和生态修复进行工程建设。由于工程实施过程中的物料和人员投入、能源消耗,整治前后土地利用类型转变,洼地治理工程在改善区域排涝条件,提高区域农业经济效益的同时,对区域碳平衡也可能产生重大影响。例如,施工阶段消耗大量的能源和材料造成碳排放,产生碳源效应;工程建设导致大面积土壤扰动可能造成水土流失,影响生态系统碳汇;土地复耕、植树种草等措施能够吸收二氧化碳,形成碳汇效应等。因此明晰洼地治理工程不同维度如工程施工、土地利用、植被以及农业生产等的碳效应,可为区域减排增汇及可持续发展提供理论依据与技术支撑。

围绕洼地治理及其他生态治理工程的碳效应研究,学界已从测算、影响因素与减排路径等方面展开了系统性探索。在碳效应测算方面,现有研究主要沿袭"碳源-碳汇"双路径评估框架:一方面基于工程材料消耗清单与碳排放系数,或引入全生命周期理论,核算工程建设及运行中因工料、能源与人工投入所产生的直接与间接碳排放[1],多数研究结果表明,能耗和材料的碳排放量最高[2];另一方面,则重点评估工程实施前后不同土地利用类型如林地、草地、湿地及耕地的植被与土壤碳储量变化[3],尤其关注生态恢复措施所带来的碳汇增益。在影响因素研究中,驱动机制研究是关键:碳排放主要受工程规模、材料类型及施工能耗等直接因素控制,同时也间接受到地区经济发展水平与技术条件的调控[4];而碳汇变化则与气候条件、土壤属性及土地利用转换方式密切相关,这些因子普遍存在空间异质性及交互效应,需借助动态模型进行解析[5]。在减排增汇路径上,前期研究提出了能源结构优化、施工工艺低碳化以及基于自然的生态系统保护与修复等策略[6]。在开发新材料和新方法的过程中,涉及低碳因素,或低碳措施,但仅靠这一点并不能实现碳减排。洼地治理工程可以看作是一种生态系统模式,当该系统的过程因子不变时,可从系统的投入方面入手,启动碳减排策略的研究。目前水利工程的碳效应量化和分析多集中于大型水利水电工程、高标准农田建设、工矿复垦等,缺乏针对以工程措施为核心的、多目标综合性洼地治理项目的系统碳效应评估,在一定程度上限制了该方面水利行业减排潜力的开发与技术进步,且难以全面反映洼地治理工程对环境的综合碳影响。

山东省淮河流域重点平原洼地沿运片邳苍郯新片区治理工程(以下简称平原洼地治理工程)是国家级重点水利工程,该工程通过河道治理、堤防建设和土地利用结构调整等综合措施,显著改善了区域防洪排涝能力并重塑了生态格局,工程治理过程中对物质投入和能源消耗的需求增加,对区域碳循环产生了显著影响。本研究核心科学问题是分析洼地工程治理过程中的碳源/汇效应。为解决这一科学问题,研究旨在构建平原洼地治理工程全生命周期碳效应评估框架,并提出低碳优化路径。因此本文以平原洼地治理工程为例,结合碳排放系数法、生态系统类型法和生物量-碳储量转换法等,对工程施工阶段碳效应、土地利用结构碳效应、水土保持措施碳效

应及农业生产碳效应4个维度进行量化与分析，旨在揭示不同环节的碳效应贡献度并对其进行讨论，探寻减排增汇的策略，为区域绿色基础设施建设提供科学数据依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省淮河流域沿运片和邳苍郯新片区洼地位于山东省枣庄市和临沂市，包括山东省枣庄市峄城区和台儿庄区，临沂市兰陵县、郯城县、罗庄区、兰山区和河东区，地理坐标34°24′—35°9′N，117°24′—118°27′E，总治理面积为2 894.29 km²。

1.2 数据来源

施工期间各种材料和能源消耗量来源于山东省水利科学研究院编制的《山东省淮河流域重点平原洼地沿运片邳苍郯新片区治理工程施工组织设计报告》《山东省淮河流域重点平原洼地沿运片邳苍郯新片区治理工程水土保持设施验收报告》；工程施工前后土地利用类型面积数据以及种植植被数据来源于《山东省淮河流域重点平原洼地沿运片邳苍郯新片区治理工程水土保持监测总结报告》；农业生产所需材料能源使用量以及各种农作物产量等数据来自于2021年和2024年《枣庄市统计年鉴》《临沂市统计年鉴》；碳排放因子数据、植被生物量异速生长方程、农作物碳吸收量相关参数以及植被和土壤密度数据来源于相关文献，具体数据及量纲详见相关研究方法。

1.3 研究方法

工程施工碳效应即碳排放量采用碳排放系数法来测算，即将各碳源投入量分别乘以对应的碳排放系数汇总获取。由于施工阶段会消耗大量材料和能源，是碳源效应的主要贡献阶段，因此本研究只考虑施工阶段的碳效应，采用碳排放系数法计算，计算公式为

$$E_c=\sum_{i=1}^{n}M_i\cdot C_i \tag{1}$$

式中：E_c表示施工阶段碳排放量（kg，以CO_2计）；M_i表示各种碳源投入量（单位依碳源类型定，包括m^3，t，kW·h等）；C_i表示各碳源的碳排放系数，即单位能源燃烧或使用过程中产生的二氧化碳排放量（kg/m^3）；i表示不同能源或材料；n表示能源或材料的总种类数。碳源单位、碳排放系数及其单位详见表1。

土地利用变化碳效应是指工程施工前后由于地类转换带来的碳储量变化，采用生态系统类型法进行测算，具体计算公式为

$$C_z=\sum_{i=1}^{n}L_i\times(S_i+P_i) \tag{2}$$

式中：C_z表示土地利用总碳储量变化值（t）；L_i为i种土地利用面积变化值（hm^2）；S_i，P_i为i种土地利用的土壤碳密度和植被碳密度（t/hm^2），其中耕地、园地、林地、建设用地、水域及裸地的植被碳密度[7-9]分别为3.25，11.6，28.11，1.03，1.6和0.67；土壤碳密度[8-9]分别为86.8，20.61，64.8，53.2，67.3和23.1；i表示不同土地利用类型；n表示土地利用类型的总数量。

表1 主要碳源碳排放系数

Table 1 Emission coefficients of main carbon sources

碳源类型	碳源	碳排放系数（以CO_2计）	数据来源
土方工程	土方开挖/m^3	1.086 kg/m^3	文献[10]
	土方回填/m^3	0.128 kg/m^3	文献[10]
施工材料	C30混凝土/m^3	295 kg/m^3	文献[12]
	钢筋/t	3 000 kg/t	文献[12]
	水泥/t	735 kg/ t	文献[11]
	砂/m^3	3.51 kg/m^3	文献[13]
	碎石/m^3	3.27 kg/m^3	文献[13]
	块（乱）石/m^3	1.65 kg/m^3	文献[14]
能源消耗	柴油/t	3.67 kg/kg	文献[13]
	汽油/t	3.5 kg/kg	文献[13]
	电/（kW·h）	0.618 5 kg/（kW·h）	文献[15]
人工活动	人工/工时	0.73 kg/工时	文献[10]

植被碳效应采用生物量-碳储量转换法进行测算。基于水土保持植物措施的动态性、持续性和生态性等特征，重点分析不同类型植物措施（如草本、灌木、乔木等）的碳效应，植被碳效应计算公式为

$$C_v=\sum_{i=1}^{n}B_i\cdot F_i \tag{3}$$

式中：C_v为水土保持措施植物碳储量（kg）；B_i为植物生物量（kg）；F_i为植物含碳率，即植物体内的碳含量所占总质量的比例；i为不同植物类型；n表示植物类型的总数。生物量异速生长方程是一种基于异速生长规律的统计模型，决定系数R^2是用来衡量方程拟合优度的统计指标。异速生长是指生物体的某一部位的生长速率与另一部位的生长速率不成固定比例的现象。各植物生物量异速生长方程及其含碳率由表2可知，对于未查询到的植物含碳率采用目前国际上常用的0.5。通过平均生物量法间接计算草本碳储量，即用单位面积生物量乘以覆盖面积得到研究区草本生物量，再与其含碳率相乘求得碳储量。

农业生产碳效应。农业生产碳吸收的估算采用经济产量转换法，其计算方法为

$$C_a=\sum_{i=1}^{n}Y_i\times\frac{1-W_i}{H_i}\times f_i \tag{4}$$

式中：C_a为农作物碳吸收总量（t）；Y_i表示i种农作物

的经济产量(t); W_i, H_i, f_i分别为i种农作物平均含水量、经济系数、碳吸收率,经济系数是指作物经济产量与生物产量的比值,碳吸收率是指单位面积的农作物在单位时间内通过光合作用固定、吸收大气中CO_2的能力,取值详见表3[16];i表示不同农作物种类;n表示农作物种类的总数。农业碳排放计算方法见公式(1),化肥、薄膜、农药的碳排放系数[17]分别为3.28,18.99,18.09。

表2　植被异速生长方程

Table 2　Allometric equations for vegetation growth

植被	异速生长方程	含碳率	决定系数	样本数	数据来源
柳树	$B=0.178D^{2.581}$	0.47	0.998	40	文献[18]
白蜡	$B=7.283(D^2H)^{0.622}$	0.49	0.683	39	文献[19]
樱花	$B=\mathrm{EXP}(-3.5618+2.6645\ln D)$	0.50	0.945	24	文献[20]
小叶黄杨	$B=0.182D^{2.487}$	0.50	0.973	137	文献[21]
冬青	$B=0.182D^{2.487}$	0.50	0.973	137	文献[21]
连翘	$B_b=0.385(D^2H)^{1.025}$ $B_l=0.187(D^2H)^{0.868}$	0.50	0.997 0.985	—	文献[22]

注:①B为植物生物量(kg); D为胸径(cm); H为株高(m); B_b为连翘根系部分生物量(kg); B_l为连翘叶片部分生物量(kg)。②各种植物拉丁文学名为,柳树(*Salix babylonica*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)、樱花(*Prunus serrulata*)、小叶黄杨(*Buxus microphylla*)、冬青(*Ilex aquifolium*)、连翘(*Forsythia suspensa*)。

表3　主要农作物经济系数与碳吸收率

Table 3　Economic coefficients and carbon sequestration rates of major crops

农作物种类	小麦	玉米	花生	大豆	蔬菜
经济系数	0.40	0.40	0.70	0.42	0.55
含水量	0.12	0.13	0.10	0.13	0.90
碳吸收率	0.49	0.47	0.45	0.45	0.45

2　结果与分析

2.1　施工阶段碳排放量

整体施工过程产生的碳排放量对研究区碳源效应影响较大,不同材料、能源等产生的碳排放量差异十分显著。将数据代入公式(1),计算结果可得施工阶段土方工程的碳排放量为2.32×10^4 t,材料消耗碳排放量为3.59×10^5 t,能源消耗碳排放量为9.58×10^4t,人工碳排放量为1.85×10^4t,总碳排放量为4.96×10^5 t。从各碳源来源碳排放量情况来看,该治理工程施工阶段碳排放量比例最大的是材料消耗,占72%,这凸显了材料消耗在施工阶段总碳排放量中的重要地位,表明实施有效的材料消耗碳减排策略可以显著减少总体碳排放。其次是能源消耗,比例为19%,能源消耗排放大量二氧化碳主要在于治理工程需要大量挖掘机、推土机等大型机械。从各类能源和材料等角度来看(图1),混凝土、钢筋碳排放量最大且超过1.00×10^5 t,分别为1.98×10^5 t和1.22×10^5 t,远高于其他碳排放因子产生的碳排放量;其次是柴油,其碳排放量为8.88×10^4 t。平原洼地治理工程主要是进行河道和干沟的疏浚,因此土方开挖产生的CO_2也是重要的碳源,碳排放量为2.22×10^4 t。治理工程中的土方工程量大,但其碳排放系数较小,因此碳排放量不大,而消耗的材料和能源如混凝土、钢筋等数量不多,但碳排放系数大,因此材料消耗和能源消耗产生的碳排放量比例较大。施工现场管理人员和工人生活所引起的碳排放量为1.85×10^4 t。相比之下,其他的碳排放因子如土方回填、碎石、汽油等产生的碳排放总量不超过1.00×10^4 t,总比例不足2%。

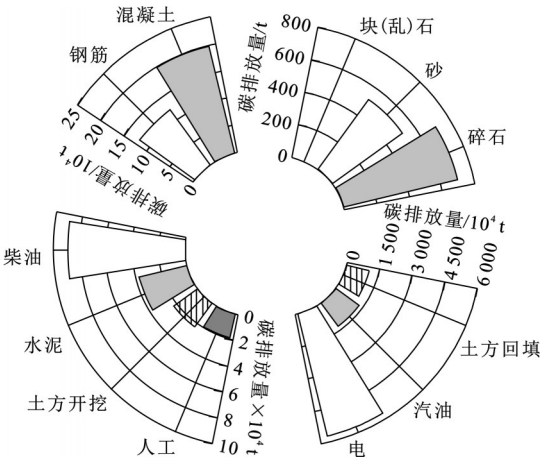

图1　工程施工阶段碳排放量

Fig.1　Carbon emissions during construction phase

2.2　土地利用碳储量变化

利用数学模型公式,代入相关数据分析2020—2023年平原洼地治理工程前后土地利用碳储量的动态变化(图2)。2020—2023年施工前后土地利用总碳储量变化以耕地和林地碳储量减少以及水域碳储量显著增加为主。平原洼地治理工程施工前后土地利用面积变化主要表现为水域面积大幅增加,耕地和林地面积显著减少,园地面积保持不变,建设用地

略有增加，裸地基本消失。区域碳储量总体呈现下降趋势，从施工前的2.95×10^5 t降至施工后的2.88×10^5 t，总碳储量减少7 366.37 t，植被碳储量整体减少3 713.80 t，土壤碳储量减少3 652.58 t。其中主要碳损失来自耕地和林地，分别减少1.81×10^4 t和1.18×10^4 t；水域总碳储量增加2.23×10^4 t，建设用地总碳储量增加222.89 t；园地和裸地碳储量无明显变化。陆地碳库的快速流失与水域碳库的渐进积累形成鲜明对比，其根本原因在于不同土地利用方式下碳循环机制的差异：陆地生态系统碳周转较快，而淹没区通过沉积作用实现的碳封存需要更长时间才能显现效益。

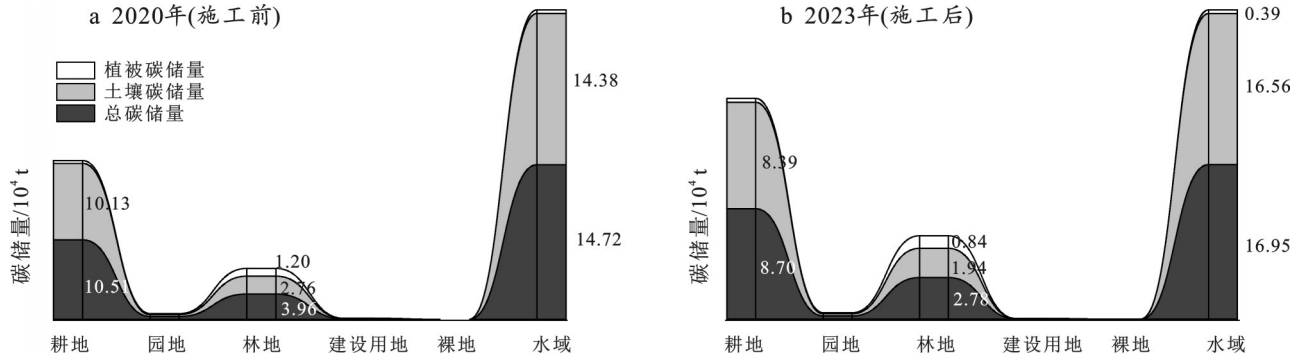

图2 施工前后土地利用碳储量变化

Fig.2 Changes in land-use carbon storage before and after construction

2.3 水土保持措施植被碳储量

在水土流失区域实施水土保持植物措施可以有效改善生态环境。根据植被碳储量的核算方法，对项目区的乔灌草植被进行计算，得到柳树、白蜡、樱花、小叶黄杨、冬青、连翘和草本的碳储量。从植物种类的角度来看（图3），治理工程中种植的白蜡碳储量为101.23 t，比例约为28%；小叶黄杨碳储量为75.62 t，占植物碳储量总量的21%，柳树、樱花、冬青和连翘的碳储量总比例为8%。从植被类型来看，乔木碳储量为122.83 t，灌木碳储量为83.42 t，草本碳储量为150.7 t，植被碳储量总体分布均匀。该治理工程水土保持植物措施碳储量比例相对平均，比例最大的是草本碳储量，约占植被碳储量总量的42%，主要原因在于草种如高羊茅、狗牙根等发芽快，短期内形成地表覆盖，能够有效减少雨水冲刷和土壤侵蚀，防止坡面滑塌，且种植技术简单，种植面积范围广，因此碳储量比例最大。其次是乔木碳储量，比例约为34%，乔木植株高大，生物量远高于灌木，能够储存更多的碳且生长周期长，碳储存时间久，随着年限的增长，其固碳效果会随之提升。

2.4 农业生产碳效应

平原洼地治理工程治理后农业生产碳汇能力得到显著提升。项目区是重要的粮食蔬菜种植区，主要农作物有小麦、玉米、花生、大豆和蔬菜。2020年平原洼地治理工程实施前项目区主要农作物的单产为43.60，42.21，30.10，17.87，394.33 t/hm^2，2023年平原洼地治理工程实施后，项目区主要农作物单产为44.30，44.66，30.25，19.18，400.97 t/hm^2，使得农田生态系统的碳吸收量有所增长。施工前主要农作物的碳储量为2.85×10^6 t，治理后为2.96×10^6 t，增量为1.07×10^5 t，其中治理前后小麦碳吸收量最大，其次是玉米碳吸收量，大豆碳吸收量最少（图4a）。小麦、玉米、大豆和蔬菜的碳储量都有所增加，而花生的碳储量较之前的有所减少，主要原因是其种植面积减少，总产量下降。2020年施工前农业物料的碳排放量为1.14×10^6 t，2023年治理后为1.10×10^6 t，减少了4.63×10^4 t，其中化肥碳排放量及其减少幅度最大，减少了3.09×10^4 t，薄膜碳排放量增加了1.35×10^4 t（图4b）。主要原因是平原洼地治理工程提高了耕地质量，提升作物产量，为积极推动低碳农业发展，减少了相关农业生产资料的投入，而农用薄膜是为了提高作物产量导致使用量持续上升，继而碳排放量也有所增加。

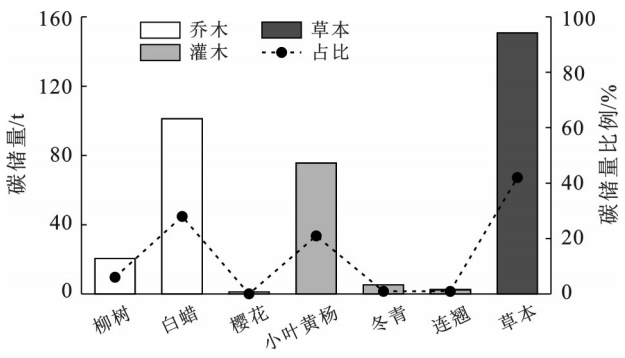

图3 水土保持措施植被碳储量及相应比例

Fig.3 Vegetation carbon storage and corresponding proportions under soil and water conservation measures

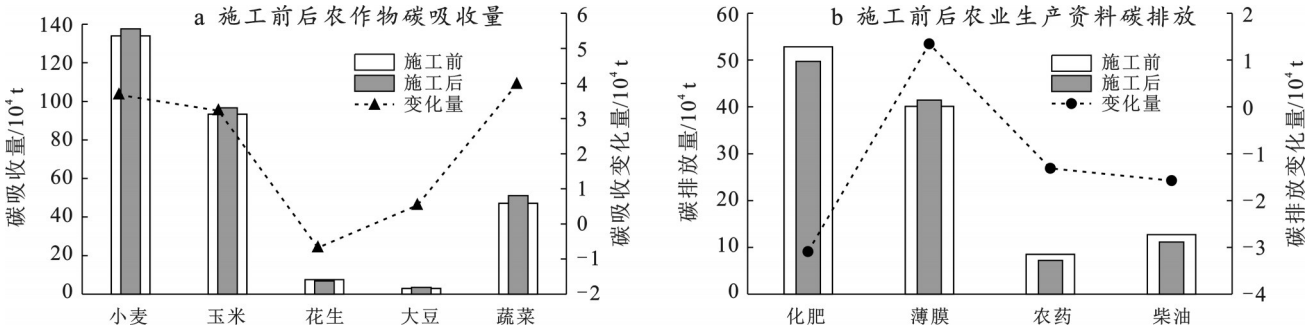

图 4　施工前后农业生产碳效应变化

Fig.4　Changes in carbon effect of agricultural production before and after construction

3　讨　论

3.1　施工碳排放量影响因素及减排措施

平原洼地治理工程施工过程中涉及的材料能源种类比较多,基于帕累托法则进行分析。帕累托法则是指事物的主要结果取决于一小部分因素,即在任何一组东西中,最重要的只占其中一小部分,约20%,其余80%尽管是多数,却是次要的。在影响平原洼地治理工程施工碳排放的12个因素中,仅混凝土、钢筋和柴油3种因素的碳排放量累计比例就已达平原洼地治理工程施工总碳排放量的82%,而剩余的9种影响因素累计比例仅有18%,该结果符合帕累托法则。由此也可见混凝土、钢筋和柴油是对平原洼地治理工程施工碳排放起决定作用的关键因素,也是主要碳排放源。根据已有研究[23],路基工程施工阶段水泥、熟石灰、柴油及钢材的累计碳排放达到85%,是影响施工阶段碳排放的关键因素。相对于建筑、道路等传统基础设施建设工程,平原洼地治理工程具有工程量大,设计范围广,能源消耗高的特点。为响应中国提出的“双碳”目标,低碳建造是平原洼地治理工程的必由之路。水利工程中混凝土和钢材是应用最广的建筑材料,当前主要采用钢筋混凝土结构形式。水泥作为混凝土胶凝材料,其生产碳排放占全国14%,钢铁行业每1 t钢排放2 t的CO_2,占全国总量10%以上。除此以外,施工技术革新与运输方案优化能显著影响设备选型、材料用量及运输距离,通过改进施工组织管理决策,可有效挖掘节能减排潜力。因此,结合水利工程特点,推动技术创新和方案优化是降低碳排放的关键途径。以不同坝型施工方案的碳排放量研究为例,重力坝生命周期温室气体排放量比堆石坝碳排放量多40.4%,在施工条件允许的情况下尽可能选择堆石坝方案[24]。平原洼地治理工程消耗材料量大,产生大量的CO_2,为缓解该方面的问题,可以使用低碳混凝土、高性能混凝土等减少碳排放并提升工程结构的使用寿命,例如填石混凝土(RFC)与常规混凝土(CC)这两种原材料相比,RFC在混凝土坝全生命周期内环境性能优于CC,可减少64%温室气体排放和55%能源消耗[25]。工程施工需要用到大量的大型机械,一般燃烧的是柴油或者汽油,使用清洁能源代替目前很难实现,因此该方面减排工作需要控制大型机械的台班数量、合理施工,提高施工机械的效率。

3.2　土地利用结构变化对区域碳储量的影响

平原洼地治理工程对区域生态系统的影响呈现出显著的正负两方面效应。从积极方面来看,水域面积增加及水体质量的改善是地类转换过程碳汇效应提升的主要来源。工程实施后水域面积的扩大不仅增强了防洪能力,还形成新的碳汇核心。但是,另一方面工程导致的耕地和林地面积减少,工程扰动如土方开挖、水位上升以及作物被清除或淹没等减少CO_2的吸收,造成近3.00×10^4 t的碳损失,可能对区域碳平衡产生长期影响。由土地利用变化对碳储量变化的响应分析可知,耕地、林地等区域是碳储量高值区,水域、建设用地等区域是碳储量低值区。当生物量较高的地类转向较低的地类时会导致碳储量减少,其他地类转化为林地等生态用地更有利于生态系统碳储量的蓄积。因此,未来在平原洼地治理工程中,新增水域面积的同时要做好减少对耕地、林地等高碳储量地类的扰动,平衡工程建设与生态保护,采取植被恢复、土壤保护和水域碳管理等措施,以降低碳损失并提升区域固碳能力。本研究揭示了平原洼地治理工程土地利用与碳储量变化之间的关系,为该地区低碳发展规划的制定提供了数据依据,但还存在一定的局限性。本研究中碳密度值主要是参考相关文献,但不同地区的碳密度受地形地貌、降水、人类活动等因素影响存在区域分异特征,与实地测量数据相比仍会存在一定误差;此外,评估中使用的碳密度数据假定在研究时段内不变,但实际上不

同用地类型的碳密度存在动态变化。因此,未来可通过连续监测或实地调研获取研究区域多年动态碳密度数据,从而提高碳储量估算的精度。

3.3 水土保持措施对区域生态系统固碳的贡献

在水土流失区域实施水土保持植物措施可以有效地改善立地条件、土地质量和生态环境。植被恢复过程中,采用乔灌草结合的水土保持措施能够有效降低水土流失。许多研究表明,不同类型的植被具有显著不同的碳储存能力,以沪宁高速边坡植被固碳量研究为例,研究结果表明不同植物物种单位面积的固碳量最大相差200多倍[26],因此在满足植被生长条件下可以尽量选择固碳量大,光合作用更强的绿化植被,以提高水土保持植物措施对该区域生态系统固碳的贡献。然而,固碳的能力和长期影响在很大程度上取决于植物物种对环境的适应能力,温带针叶阔叶林区和暖温带落叶阔叶林区,乔木的碳汇能力高于灌木,而在热带雨林季雨林区和温带草原区则相反[27]。为充分发挥各种措施调水、保水、保土等效益并使其协同作用,常常将工程措施、植物措施和临时措施相互结合、有机搭配、综合配置。平原洼地治理工程主要对施工区域进行表土剥离和回填,土地整治,植被种草,设置防护网遮盖、排水沟、挡土埂、急流槽等。水土保持工程措施能够减少对地表的干扰破坏,从而促进有机碳在土壤中的储存。土壤物理性质优化,养分含量提升,植被生长环境不断改善,使得植物措施固碳效益得到充分发挥。水土保持临时措施通过覆盖防护网减少表土有机碳的冲刷和氧化分解,直接保护土壤原有碳库,而临时排水、拦挡等措施则间接增强长期固碳潜力,在施工关键期发挥重要的过渡性固碳作用。

3.4 农业低碳转型关键路径

本研究平原洼地治理工程前后农业净碳汇总量均为正值,主要是由于该区域作物产量较高,使其具有较强的碳汇能力和潜力,足以抵消掉产生的温室气体排放量。对于农业碳源碳汇的分解,认为小麦、玉米和蔬菜是主要碳吸收农作物,化肥和薄膜是主要碳源。农业碳吸收能力的提升与农作物产量增长密切相关,而农业生产资料碳排放的减少则主要得益于生产投入的高效利用和用量的降低。随着高产作物品种的推广和农业技术的进步,单位面积生物量显著增加,更多的碳通过光合作用被固定在作物和土壤中,从而增强了农田生态系统的固碳能力。为更好地调整农作物种植结构,实现农业可持续发展,可从以下几个方面进行讨论。在减少碳排放方面要正确认识农业生产物料的作用,不盲目削减化学制品的使用量,避免因突然减少用量所造成农作物大幅度减产的局面,施肥对土壤碳储量的作用受施肥方式、类型及土壤类型的影响,单施化肥或配合施用有机肥均能固定碳,而不施肥会造成碳排放;其次完善水利设施的基础建设,减少灌溉所产生的农田生态系统碳排放;增加新能源农机使用,逐步淘汰高污染、低效益的农机设备。

在增加碳吸收方面,要有针对性地对碳吸收能力较强的农作物制定合理的种植管理方式,增加碳吸收能力强的农作物的复种次数,以最大化发挥其碳吸收能力。例如美国的一项研究显示,农林复合经营系统自开始种植,相比于对照的森林和农田,每年每1 hm^2平均多储存740和520 kg的碳[28];推广优良农作物品种和低碳型种植技术,实现农作物良种化并提高农业生产效率。

4 结 论

(1) 工程施工中材料消耗碳排放量最高,需将其作为重点减排对象。材料消耗碳排放量在施工阶段总碳排放量中比例最大,值为72%,其中混凝土和钢筋的碳排放量远高于其他碳排放因子,因此严格控制混凝土和钢筋的消耗量是有效降低碳排放量的关键。

(2) 2020—2023年施工前后土地利用总碳储量变化以耕地和林地碳储量减少以及水域碳储量显著增加为主。土地利用总碳储量减少7 366.37 t,约2%,部分耕地和林地面积转变为水域面积是碳储量减少的主导因素,因此减少了高碳储量地类的扰动是降低碳损失的重要手段。

(3) 水土保持措施和农业生产均表现为长期碳汇效应,且以农业生产碳汇效应为主。水土保持植被措施采用乔灌草组合的碳储量为356.95 t,能较好提升工程前中后期的碳汇能力;农业生产呈现净碳汇为1.54×10^5 t,主要得益于小麦、玉米和蔬菜的高产碳吸收能力足以抵消化肥和薄膜产生的碳排放,碳汇增量对通过碳汇活动抵消碳排放的效率即碳源效应补偿率超过30%,后续可通过植被配置优化调整、农业低碳治理等措施实现“减碳”与“增汇”的有机结合。

参考文献(References)

[1] Cheng Shengdong, Zhou Xin, Zhou Huan. Study on carbon emission measurement in building materialization stage [J]. Sustainability, 2023,15(7):5717.

[2] 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.
Huang Yuequn, Liu Yaoru, Xu Wenbin, et al. Life cycle carbon emissions of water reservoir and hydroelectric projects: A case study of the Quanmutang project [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022,62(8):1366-1373.

[3] Kashyap R, Kuttippurath J, Kumar P. Browning of vegetation in efficient carbon sink regions of India during the past two decades is driven by climate change and anthropogenic intrusions [J]. Journal of Environmental Management, 2023,336:117655.

[4] 门丹,黄雄.江西省碳排放影响因素研究:基于LMDI分解法[J].生态经济,2019,35(5):31-35.
Men Dan, Huang Xiong. Research on the factors affecting carbon emissions in Jiangxi Province: Based on LMDI method [J]. Ecological Economy, 2019,35(5):31-35.

[5] 黄安,王燕,田莉,等.土地利用系统碳效应研究进展与展望:机制、模拟与优化[J].自然资源学报,2024,39(10):2450-2470.
Huang An, Wang Yan, Tian Li, et al. Research progress of carbon effect in land use system: Mechanisms, simulations and optimization [J]. Journal of Natural Resources, 2024,39(10):2450-2470.

[6] 周晟吕,胡静,李立峰.崇明岛中长期碳排放预测及其影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(4):632-639.
Zhou Shenglü, Hu Jing, Li Lifeng. Prediction of Chongming Island's medium and long-term carbon emissions and its influencing factor analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(4):632-639.

[7] Zhu Linye, Xing Huaqiao, Hou Dongyang. Analysis of carbon emissions from land cover change during 2000 to 2020 in Shandong Province, China [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):8021.

[8] 丛文翠,孙小银.基于GIS和InVEST模型的日照市固碳能力研究[J].水土保持通报,2018,38(5):200-205.
Cong Wencui, Sun Xiaoyin. A study on carbon sequestration capacity based on GIS and InVEST model in Rizhao City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5):200-205.

[9] 苗议艺.基于FLUS和InVEST模型的县域土地利用变化及碳储量优化模拟研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2022.
Miao Yiyi. Optimization and simulation of county land use change and carbon storage based on FLUS and InVEST models [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.

[10] 陈冲.基于LCA的建筑碳排放控制与预测研究[D].湖北 武汉:华中科技大学,2013.
Chen Chong. Research of building carbon emissions control and forecast based on LCA theory [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部关于发布国家标准《建筑碳排放计算标准》的公告[EB/OL].[2025-10-26].2019.https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2019/art_17339_240723.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Announcement on issuing the national standard "Standard for building carbon emission calculation" [EB/OL]. [2025-10-26]. 2019. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2019/art_17339_240723.html.

[12] 孟昊杰.装配式建筑施工碳排放计算及影响因素研究[D].四川 成都:西南交通大学,2018.
Meng Haojie. The calculation of carbon emissions and research of influencing factors about prefabricated construction [D]. Chengdu, Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2018.

[13] 汪慧颖.广西高速公路建设期碳排放计算及预测研究[D].广西 南宁:广西大学,2022.
Wang Huiying. Study on carbon emission calculation and prediction of Guangxi expressway construction period [D]. Nanning, Guangxi: Guangxi University, 2022.

[14] 黎礼刚,李凌云,周紧东,等.护岸工程材料综合能耗和碳排放计算及评价[J].人民长江,2012,43(7):50-55.
Li Ligang, Li Lingyun, Zhou Jindong, et al. Calculation and evaluation of comprehensive energy consumption and carbon emissions of revetment works materials [J]. Yangtze River, 2012,43(7):50-55.

[15] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心.2024年减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL].(2026-01-13). https://ccer.cets.org.cn/notice/noticeDetail bulletinInfoId=1460687925200162816.
National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation. Emission reduction project China regional power grid baseline emission factor in 2024 [EB/OL]. (2026-01-13). https://ccer.cets.org.cn/notice/noticeDetail bulletinInfoId=1460687925200162816.

[16] 汤李琛,李洁,陈慧,等.西部大开发地区种植业净碳汇时空格局及驱动因素[J].环境科学,2025,46(8):4850-4863.
Tang Lichen, Li Jie, Chen Hui, et al. Spatial-temporal patterns and driving factors of net carbon sink in planting industry in the west China development area [J]. Environmental Science, 2025,46(8):4850-4863.

[17] 刘秀芳,张丽君,秦耀辰,等.黄河流域519个县农业碳

收支时空变化及影响因素[J].河南大学学报(自然科学版),2025,55(2):127-141.
Liu Xiufang, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Spatial-temporal changes of agricultural carbon budget and its influencing factors in 519 counties in the Yellow River basin [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2025,55(2):127-141.

[18] Nordh N E, Verwijst T. Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice: A comparison between destructive and non-destructive methods [J]. Biomass and Bioenergy, 2004,27(1):1-8.

[19] 曹萌,牛树奎,李连强.松山自然保护区5种灌木的地上生物量模型[J].福建农林大学学报(自然科学版),2018,47(4):435-438.
Cao Meng, Niu Shukui, Li Lianqiang. The model of aboveground biomass of five kinds of shrubs in Songshan nature reserve [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2018,47(4):435-438.

[20] Jo H K, McPherson G E. Carbon storage and flux in urban residential greenspace [J]. Journal of Environmental Management, 1995,45(2):109-133.

[21] 李晓娜,国庆喜,王兴昌,等.东北天然次生林下木树种生物量的相对生长[J].林业科学,2010,46(8):22-32.
Li Xiaona, Guo Qingxi, Wang Xingchang, et al. Allometry of understory tree species in a natural secondary forest in northeast China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010,46(8):22-32.

[22] Yao Zhengyang, Liu Jianjun, Zhao Xiaowen, et al. Spatial dynamics of aboveground carbon stock in urban green space: A case study of Xi'an, China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(3):350-360.

[23] 靳春玲,羊青青,贡力,等.铁路路基工程施工阶段碳排放评估及分析[J].铁道运输与经济,2024,46(11):53-61.
Jin Chunling, Yang Qingqing, Gong Li, et al. Assessment and analysis of carbon emissions in construction phase of railway roadbed engineering [J]. Railway Transport and Economy, 2024,46(11):53-61.

[24] 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.
Zhang Sherong, Pang Bohui. Analysis on environmental discharge of large-scale hydropower project using carbon footprint theory [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(4):170-176.

[25] Liu Chunna, Ahn C R, An Xuehui, et al. Life-cycle assessment of concrete dam construction: Comparison of environmental impact of rock-filled and conventional concrete [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2013,139(12):A4013009.

[26] Fu Dafang, Bu Bei, Wu Jiaguo, et al. Investigation on the carbon sequestration capacity of vegetation along a heavy traffic load expressway [J]. Journal of Environmental Management, 2019,241:549-557.

[27] 刘童,鲍首辰,袁涛.中国不同植被区植物碳汇能力研究进展[J].林草资源研究,2024(4):12-20.
Liu Tong, Bao Shouchen, Yuan Tao. Advances in research on plant carbon sequestration capacity across different vegetation zones in China [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(4):12-20.

[28] Sharrow S H, Ismail S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA [J]. Agroforestry Systems, 2004, 60(2):123-130.

(上接第203页)

[24] Lin Changgui, Yang Kun, Qin Jun, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960 [J]. Journal of Climate, 2013,26(9):2891-2903.

[25] 修丽娜,颜长珍,钱大文,等.生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J].水土保持通报,2019,39(4):214-228.
Xiu Lina, Yan Changzhen, Qian Dawen, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):214-228.

[26] 周紫燕,汪小钦,丁哲,等.新疆生态质量变化趋势遥感分析[J].生态学报,2020,40(9):2907-2919.
Zhou Ziyan, Wang Xiaoqin, Ding Zhe, et al. Remote sensing analysis of ecological quality change in Xinjiang [J].Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9):2907-2919.

[27] 王强,张勃,戴声佩,等.基于GIMMS AVHRR NDVI数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J].资源科学,2011,33(8):1613-1620.
Wang Qiang, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Dynamic changes in vegetation coverage in the three-north shelter forest program based on GIMMS AVHRR NDVI [J]. Resources Science, 2011,33(8):1613-1620.