

淤地坝保碳、减排、增汇作用与其能力评估

李智广¹, 成辉^{1,2,3}, 方怒放^{3,4}, 曾奕^{3,4}

(1.水利部水土保持监测中心,北京 100053;2.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,

陕西 杨凌 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;

4.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:淤地坝是黄土高原地区重要的沟道治理措施,也是陆地生态系统中重要的储碳场所。评估淤地坝的碳汇作用与能力,可为研究其他水土保持措施碳汇提供重要借鉴,也为我国碳达峰、碳中和目标提供科学依据。以黄土高原淤地坝为研究对象,系统探讨淤地坝的碳汇效应与机理,提出淤地坝碳汇能力估算方法。结果表明:淤地坝具有保土保碳、减蚀减排和增绿增汇作用。在过去 50 年中黄土高原淤地坝保碳能力为 2.16×10^7 t C,减排能力为 $4.33 \times 10^6 \sim 8.66 \times 10^6$ t C,增汇能力为 6.84×10^5 t C。淤地坝产生积极的碳汇效益,对提升生态系统碳中和能力、降低碳达峰的峰值发挥重要作用。淤地坝与其他主要水土保持措施都具有保土、减蚀等多种水土保持效益,可充分发挥保碳、减排、增汇等多种碳汇作用。推行碳汇水土保持工作,实施水土保持增汇行动,既可全面巩固陆地生态系统碳汇作用,又能持续提升生态系统增汇能力,对碳达峰与碳中和作出水土保持贡献。

关键词:水土保持措施;淤地坝;碳汇;碳中和;碳达峰

中图分类号:S157.3⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)04-0001-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.001

The Role of Yudiba Dams in Protecting Carbon, Reducing Carbon Emission and Enhancing Carbon Sequestration and Its Capability Assessment

LI Zhiguang¹, CHENG Hui^{1,2,3}, FANG Nufang^{3,4}, ZENG Yi^{3,4}

(1.*Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053;*

2.*The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education,*

Yangling, Shaanxi 712100; 3.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry*

of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4.*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on*

the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Analyzing the carbon sequestration function and evaluating the carbon sequestration capacity of Yudiba dams is a crucial prerequisite for determining the carbon sequestration effects of Yudiba dams and other soil and water conservation measures, and can provide valuable data references for achieving carbon emission peak and carbon neutralization. Here, we take the Yudiba dams on the Chinese Loess Plateau as the research object, systematically exploring the carbon sequestration effect and mechanism of Yudiba dams, and propose an estimation method for their carbon sequestration capacity. The results show that Yudiba dams effectively protect soil and carbon, mitigate erosion and carbon emission, and promote vegetation and carbon sequestration. In the past 50 years, the carbon conservation, carbon emission reduction, and carbon sequestration capacity of Yudiba dams on the Chinese Loess Plateau are 2.16×10^7 , $4.33 \times 10^6 \sim 8.66 \times 10^6$ and 6.84×10^5 t C, respectively, which can enhance the carbon neutralization capacity of the ecosystem and reduce the carbon peak value. Yudiba dams and other significant soil and water conservation measures have demonstrated a variety of positive ecological restoration benefits, such as soil conservation, erosion

收稿日期:2023-02-27

资助项目:国家自然科学基金项目(42077071,42207405);全国水土流失动态监测和水土保持信息系统更新维护项目(126216229000200002)

第一作者:李智广(1966—),男,博士,正高级工程师(二级),主要从事水土保持监管、监测、信息化、项目建设和科技研究。E-mail: lizhiguang@mwrr.gov.cn

通信作者:方怒放(1985—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail: fnf@ms.iswc.ac.cn

reduction, and vegetation restoration, which fully promote the comprehensive role of carbon sequestration in carbon conservation, carbon emission reduction, and carbon sequestration increase. The implementation of soil and water conservation that focus on enhancing carbon sequestration not only reinforces the significance of terrestrial ecosystems in carbon sequestration, but also leads to a continual improvement of the carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems, and plays a significant role in achieving carbon emission peak and carbon neutrality within the sphere of soil and water conservation.

Keywords: soil and water conservation measures; yudiba dam; carbon sequestration; carbon neutrality; peak carbon dioxide emissions

淤地坝是修筑在我国黄土高原水土流失区支、干、毛沟内的水土保持沟道治理工程,具有削弱侵蚀动能、蓄水滞洪消峰、拦泥淤地造田、减少入河泥沙等多重功能,对防治区域水土流失、改善生产生活条件发挥了重大作用。第一次全国水利普查^[1]表明,截至 2012 年,黄土高原共有淤地坝 58 446 座,共淤积土地 927.57 km²;Fang 等^[2]基于多源高分影像和基于对象的分类方法发现,至 2020 年黄土高原已形成坝地的淤地坝有 50 226 座,淤积的坝地面积为 931.00 km²。在应对全球气候变化、实施碳达峰碳中和的背景下,许多研究表明,淤地坝通过拦截侵蚀泥沙,进而深埋和封存大量的土壤有机碳(soil organic carbon, SOC),构成了重要的碳汇,如李勇等^[3]、Wang 等^[4]、Ran 等^[5]、Zeng 等^[6]结合相关文献以及实测数据估算了淤地坝碳储量;Zhang 等^[7]和王震等^[8]通过分析坝地沉积区 SOC 矿化速率认为,淤地坝可以降低土壤呼吸速率;Zeng 等^[9]基于放射性碳同位素分析表明,在侵蚀过程中较年轻的生物源有机碳更容易被分解,若被侵蚀的有机碳不被拦截将会成为重要碳源。目前的研究主要集中在淤地坝碳储量的估算,鲜有研究进一步全面分析淤地坝在碳汇方面的作用与机理,及其淤地后所提升的储碳与增汇能力。本文全面、系统地分析淤地坝在保土保碳、减蚀减排和增绿增汇等方面的作用与机理,研究提出淤地坝碳汇能力的评估方法,阐明淤地坝碳汇效益对碳达峰碳中和的重要意义,为进一步深入分析和研究淤地坝以及其他主要水土保持措施的碳汇作用、机理、能力大小,厘清水土保持工作对碳达峰碳中和的贡献提供参考。

1 淤地坝碳汇作用

淤地坝具有拦泥淤地、滞洪消峰、减少土壤流失等功能,能够拦截、深埋和封存坡面流失的肥沃土壤,有利于种植作物或其他林草植被。这些保土、保肥、利于作物和植被生长发育等多种作用共同发挥效应,使得淤地坝产生良好的碳汇效益。这主要体现在 3 个方面(图 1):一是拦泥保土所发挥的保碳作用;二

是减少土壤侵蚀所发挥的减排作用;三是增加坝地土壤碳储量所发挥的增汇作用。

1.1 保碳作用

淤地坝的保碳作用是指淤地坝通过拦截小流域内的侵蚀泥沙,从而保存侵蚀泥沙中携带的 SOC 的作用和能力。在小流域沟道中修建淤地坝后,改变沟道侵蚀动能与泥沙输移过程,促进泥沙和 SOC 在坝前淤积,并深埋和封存在坝地当中,提高 SOC 的稳定性^[10]。淤地坝的保碳作用主要体现在其高的碳储量以及高的 SOC 埋藏效率。早期的研究通常基于官方统计的淤地坝普查资料估算淤地坝的碳储量。李勇等^[3]估算,截至 2002 年,黄土高原淤地坝碳储量约为 0.12 Pg,是同期全国生态恢复工程碳汇的 17%;Wang 等^[4]结合淤地坝统计资料和 SOC 实测数据估算,淤地坝拦截泥沙总量超过 2.1×10^{10} m³,其 SOC 储量为 0.95 Pg,是全国森林碳储量的 18%~24%;Lü 等^[11]基于清查资料估算了黄土高原大中型淤地坝的碳储量约 0.42 Pg,约等于 2000 年中国化石燃料碳排放量的 4%;Fang 等^[2]近期结合大规模野外调查和遥感技术,对黄土高原淤地坝的拦沙量和碳储量进行可靠的估计发现,黄土高原 50 226 座淤地坝在近五十年内(1970—2020 年)保存了 (10.2 ± 0.6) Pg 的侵蚀泥沙和 (0.02 ± 0.01) Pg 的 SOC。

值得注意的是,SOC 的沉积或储量仅代表 SOC 输入沉积系统的总量。只有考虑沉积环境中 SOC 的稳定性及保存程度(定义为 SOC 埋藏效率),才能更好地反映淤地坝沉积环境的保碳作用。王震等^[8]模拟淤地坝原始沉积环境认为,埋藏的 SOC 分解速率仅为有氧条件下的 11.4%,埋藏环境显著降低 SOC 分解速率;周仕轩等^[10]对比了不同利用年限、不同沉积深度 SOC 稳定性认为,坝地深层 SOC 具有较高的稳定性;Zhang 等^[7]分析了坡耕地和坝地 SOC 的矿化速率发现,坡耕地 SOC 的矿化速率是坝地土壤的 3 倍;Fang 等^[2]结合 86 个淤地坝沉积剖面以及碳同位素分析和放射性碳同位素模型等方法估算黄土高原淤地坝 SOC 埋藏效率约为 80%,显著高于水库、湖泊、冲积平原等典型沉积环

境。高的 SOC 埋藏效率取决于被侵蚀的有机碳的自身组成特征,以及沉积环境的物理、化学、生物驱动因素^[2]。首先,黄土高原坝地沉积区有机碳含量为 2~3 g/kg,显著低于已经报道的其他沉积区。低有机碳含量通常伴随着低的有机碳分解潜力^[6]。其次,放射性碳同位素数据表明,坝地沉积区的碳相当老化,平均碳年龄为 6 000 年。先前的研究^[9]也表明,来源于早更新世午城黄土的化石源有机碳占据坝地 SOC 的 64%。此外,坝地沉积区有机碳含量和细颗粒呈极显著正相关,细小的颗粒更容易与有机碳形成有机-矿物复合体。有机碳在细颗粒中的富集和团聚形成稳

定的物理屏障,避免有机碳的分解。有研究^[2]表明,淤地坝沉积区有机碳主要由稳定有机碳库组成,其中矿物结合态有机碳约占 70%。最后,黄土高原淤地坝沉积区的深度通常为几米到几十米,这是其他研究中沉积区深度的数十倍。坝地沉积区的高土壤含水量、容重以及低含氧量等环境特征显著降低微生物的生物量和活性,限制有机碳的分解^[7]。具有低 SOC 含量、高稳定性和古老碳年龄等特征的侵蚀有机碳能够在淤地坝特殊的沉积环境下有效保存,导致淤地坝成为重要的陆地沉积碳库,在发挥良好水土保持效益的同时产生积极的保碳作用^[2]。

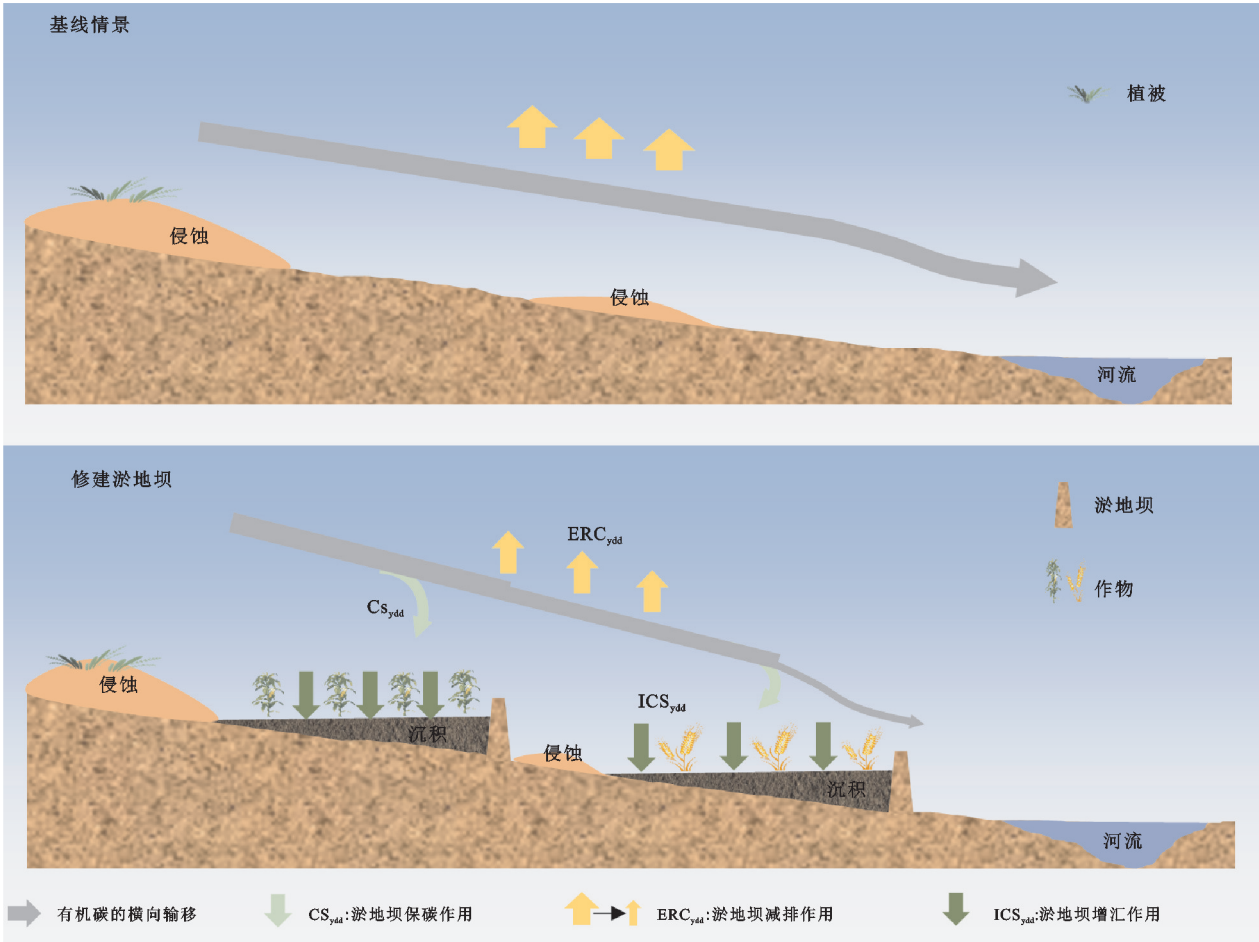


图 1 淤地坝保碳、减排、增汇作用示意

1.2 减排作用

淤地坝的减排作用是指淤地坝拦截泥沙、减少 SOC 在侵蚀搬运过程中的矿化分解,埋藏 SOC、降低其分解速率的作用和能力。在没有建坝的情景中,侵蚀搬运过程会破坏团聚体结构,影响 SOC 的稳定性,将原本封存在团聚体中的 SOC 暴露于微生物过程中,导致 SOC 在搬运过程中的分解矿化。Lal^[12]研究认为,全球每年因土壤侵蚀导致 0.8~1.2 Pg C 排放到大气中;Lugato 等^[13]整合欧盟农业土壤相关的所有碳通量,估计 2016—2100 年欧盟农业土壤侵蚀将作为碳

源,以 0.92~10.0 Tg/a C 的速率向大气排放二氧化碳;Yue 等^[14]估算中国泥沙输移过程中 SOC 的分解速率为 (1 ± 0.5) Pg/a C;Zeng 等^[9]研究发现,1969—2015 年,黄土高原沙堰沟小流域侵蚀搬运的 SOC 为 1 085.8 t,在侵蚀过程中 SOC 损失 50%,若不将其拦截将导致更多 SOC 矿化分解,成为大气 CO₂ 的源。而淤地坝通过拦截、深埋和封存大量 SOC,减少 SOC 长时间、远距离的搬运,从而减少其在进一步搬运过程中的矿化排放。先前的研究^[15]表明,如果没有淤地坝等水土保持措施,更多古老的化石源有机碳和

现代生物源有机碳将被输送到下级河网,并最终输送到海洋中,而不是隔离在陆地生态系统中。在高侵蚀速率的环境中或者长距离输移过程中,古老的化石源有机碳和现代生物源有机碳都将发生不同程度的分解^[16]。淤地坝的建设不仅显著降低有机碳的输出通量,而且减少化石源有机碳与现代生物源有机碳在长距离输移过程中的分解,而这些分解过程分别是大气二氧化碳的长期和短期的碳源^[6]。

1.3 增汇作用

淤地坝的增汇作用是指淤地坝为作物及其他林草植物生长提供基础条件,提升坝地表层 SOC 含量的作用和能力。在未修建淤地坝之前,严重的侵蚀和恶劣的环境导致植被和作物难以生长。在淤地坝发挥功能后,不断淤积的土壤、良好的水分条件,改善了坝地的水、肥、气、热诸多条件,使土壤可耕性得以改观,为作物或其他植被的生长提供良好土壤环境,极大地促进作物和其他植物的生长发育。作物和植物通过光合作用吸收大气中的 CO₂,不断形成的枯落物、根系分泌物,并且耕作中的施肥、留茬、秸秆还田等措施又进一步作用于土壤,不断为土壤提供有机质,增加坝地 SOC 含量,提升坝地土壤碳储量。淤地坝淤积的土壤多来源于小流域上游土壤表层,营养较为丰富,能形成较肥沃的土地,无论是种植作物还是其他植物都能发挥良好的增汇作用。文雯等^[17]分析了羊圈沟流域不同土地利用方式下的 SOC 密度发现,坝地 SOC 密度高于坡耕地;马安利^[18]对淤地坝、梯田、坡耕地的增产效益和土壤养分进行 5 年监测发现,淤地坝作物产量和土壤有机质含量均高于梯田与坡耕地;Zeng 等^[6]和 Fang 等^[2]等通过大范围实测数据发现,淤地坝坝地表层有机碳含量为 3~5 g/kg,显著高于原始沟道有机碳含量(1~2 g/kg)。根据第一次全国水利普查公报^[1]以及 Fang 等^[2]基于卫星遥感分析,目前黄土高原淤地坝已经形成坝地 927~931 km²。根据黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年),未来还将修建 56 161 座淤地坝。这些可供作物种植或植被恢复的坝地将通过作物或植被的光合作用不断固定空气中的 CO₂,并增加土壤碳的积累,发挥积极的固碳和增汇作用。

2 淤地坝碳汇能力评估方法

淤地坝碳汇能力评估方法是相较于未修建淤地坝的基线情景所提出的,可定量反映上述的淤地坝保碳、减排、增汇等作用的大小,有利于阐明淤地坝能够发挥的碳汇能力。

2.1 保碳能力评估方法

淤地坝保碳能力是指相较于基线情景,淤地坝所拦截土壤中的 SOC 储量。处于基线情景的沟道,常常发生土壤流失,在较长时间内总是处于侵蚀和流失的状态。因此,可认为基线情景没有保碳能力(即保碳能力为 0),不在评估公式中体现。评估公式为:

$$CS_{ydd} = \sum_{i=1}^n (V_{yddi} \cdot \rho d_{yddi} \cdot SOC_{yddi}) \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

式中:CS_{ydd}为淤地坝保碳能力(t C);V_{yddi}为淤地坝淤积的第*i*层土壤的体积(m³);ρd_{yddi}为淤地坝淤积的第*i*层土壤的容重(g/cm³);SOC_{yddi}为淤地坝淤积的第*i*层土壤的有机碳含量(g/kg);*n*为淤地坝淤积土壤的总分层数,无量纲。

Fang 等^[2]研究表明,黄土高原已形成坝地的淤地坝在过去 50 年中共拦截泥沙 1.02×10¹⁰ t,泥沙中平均 SOC 含量为 2.12 g/kg,淤地坝的保碳能力为 2.16×10⁷ t C。

2.2 减排能力评估方法

淤地坝减排能力是指相较于基线情景,淤地坝拦截土壤、避免土壤流失造成其中有机碳被矿化排放的数量,其数值就是:若将淤地坝所拦截的土壤全部流失,SOC 继续搬运被矿化排放掉的碳量。评估公式为:

$$ERC_{ydd} = CS_{ydd} \cdot P_{se} \quad (2)$$

式中:ERC_{ydd}为淤地坝减排能力(t C);CS_{ydd}为淤地坝保碳量(t C);P_{se}为搬运过程中 SOC 被氧化的比例(%)。

目前,关于 SOC 在侵蚀搬运过程中的矿化比例,相关研究存在较大差异。Lal^[12]认为,SOC 在搬运过程中有 20%被矿化排放;Jacinthe 等^[19]通过测定径流过程中碳的矿化分解发现,搬运过程中有 29%~35%的有机碳被矿化,在氮添加情况下有 33%~46%的有机碳被矿化;Wang 等^[20]认为,径流累计 CO₂排放量仅占初始径流有机碳的 3.9%~4.8%;Ran 等^[21]利用土壤侵蚀数据估算黄河流域侵蚀 SOC 认为,有 27%的 SOC 在侵蚀和运输过程中被分解。结合这些研究,将 20%~40%作为 SOC 在侵蚀搬运过程中的矿化分解比例,基于 Fang 等^[2]估算的淤地坝保碳能力,可估算黄土高原淤地坝的减排能力为 4.33×10⁶~8.66×10⁶ t C。

2.3 增汇能力评估方法

淤地坝增汇能力是指相较于基线情景,淤地坝坝地表层土壤(30 cm)所增加的碳储量。评估公式为:

$$ICS_{ydd} = A_{ydd} \cdot (\Delta DSOC_{ydd} - \Delta DOC_{df}) \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

式中:ICS_{ydd}为淤地坝增汇能力(t C);A_{ydd}为淤地坝沟道面积(hm²);ΔDSOC_{ydd}为坝地在测量时刻与起始时刻的土壤有机碳密度差值(g/m²);ΔDSOC_{df}为基线情景在测量时刻与起始时刻的土壤有机碳密度差值(g/m²)。

由于采样过程缺乏实测起始时刻土壤容重、SOC含量等指标,因此,利用淤地坝和沟道表层土壤平均SOC含量进行估算。截至2020年,过去50年黄土高原淤地坝已形成坝地面积为 931 km^2 ,通过实测淤地坝表层平均SOC含量为 3.50 g/kg ,沟道平均SOC含量为 1.70 g/kg 。若假定淤地坝平均土壤容重为 1.36 g/cm^3 ,增汇集中在 30 cm ,可推算黄土高原淤地坝增汇能力为 $6.84\times 10^5\text{ t C}$ 。

值得注意的是,在评估淤地坝及其他水土保持措施的保碳、减排、增汇能力时,要注意科学设定基线情景、设计数据获取方法,并做到与评估方法相对应,保证评估结果可测量、可报告、可核查。比如,在计算淤地坝的增汇能力时,要对比的基线情景是未修建淤地坝沟道土壤的碳密度,而不应对比坡耕地土壤的碳密度。此外,淤地坝及其他水土保持措施的保碳能力和增汇能力是措施地块和所在小流域的碳汇物质,但减排能力是根据水土保持措施所拦截、沉积的土壤,反推得出的因减少和避免土壤流失所具有的功能,并没有直接的碳汇实物。在实际评估保碳能力与增汇能力时,要使用合理的采样方法,科学区分保碳、减排和增汇的能力;否则会发生重复计算,导致评估数值偏大的问题。

3 淤地坝保碳、减排和增汇对碳达峰碳中和的作用

根据《淤地坝技术规范》(SL/T 804—2020)^[22],新建的淤地坝一般具有坝体、放水建筑物和泄洪建筑物“三大件”,加上日常监测、运维和管理,形成可持续的沉积环境。即使是过去只有坝地的淤地坝,只要没有被冲毁,其干燥、缺氧和高容重的沉积条件,有助于有机碳埋藏^[2]。淤地坝所具有的保土保碳、减蚀减排和增绿增汇3个作用在助力实现碳达峰碳中和当中具有不同的功能。

3.1 淤地坝保碳和减排有利于降低碳达峰时点的碳峰值

我国将在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。降低碳达峰的峰值可减轻碳中和难度,有利于实现碳中和。淤地坝的保土保碳作用,虽没有直接削减大气中 CO_2 ,但拦截、深埋和封存富含SOC的土壤,大大地减缓、减少甚至避免SOC变为大气 CO_2 的“源”。估算黄土高原淤地坝的保碳能力($2.16\times 10^7\text{ t C}$)分别是黄土高原植被恢复以后(1999—2010年)森林生物量碳库($5.27\times 10^8\text{ t C}$)和土壤碳固存总量($1.55\times 10^8\text{ t C}$)的 4.0% 和 13.5% ^[23]。而淤地坝的减蚀减排作用,则直接降低 $4.33\times 10^6\sim 8.66\times 10^6\text{ t C}$ 向大气中排放,为

降低碳达峰的峰值、降低 CO_2 总量发挥作用。

3.2 淤地坝增汇可提升陆地生态系统的碳中和能力

淤地坝的增绿增汇作用,通过转化植物的枯枝落叶等有机质,间接地减少空气中的 CO_2 ,不断提升淤地坝坝地土壤的碳汇能力,这是淤地坝直接发挥的增汇作用与能力。修建淤地坝可使荒沟变为高产、稳产、便于耕作的良田,这既可促进区域植被面积增加、植被结构改善,又可极大地巩固退耕还林成果,确保退耕还林工程真正做到“稳得住、不反弹”,进而持续提升黄土高原生态系统的碳汇增量^[24]。

4 结论与展望

淤地坝良好的拦截泥沙、沉积土壤的水土保持效益,形成保碳、减排、增汇的作用与能力,可发挥巩固生态系统碳汇能力、提升生态系统碳汇增量的作用,对碳达峰和碳中和具有积极作用。修建淤地坝可使荒沟变为高产、稳产、便于耕作的良田,既可促进所在区域甚至整个黄土高原持续地“扩绿”,又可巩固退耕还林成果,保障黄土高原由浅绿向深绿发展,进而持续提升黄土高原生态系统的碳汇增量。未来淤地坝及水土保持碳汇研究开展的方面有:

(1)通过开展大量野外调查采样,获取淤地坝原始数据,提升碳汇估算精度。可在黄土高原不同地理分区的典型坝控流域获取更多坝地沉积剖面不同深度的有机碳实测数据,从而降低淤地坝碳汇效益估算的不确定性。

(2)加强淤地坝碳汇机理基础研究,分析淤地坝不同碳汇作用的机制。通过室内碳矿化培养试验或野外碳排放原位观测确定沉积有机碳稳定性及其分解速率,从而准确量化淤地坝减排能力。结合单位面积坝地作物、植被固碳潜力以及准确的坝地面积数据,从而准确估算淤地坝增汇能力。

(3)结合遥感技术和地理信息云平台,构建高精度淤地坝地理空间信息、拦沙量和碳汇效益基础数据库。通过高分二号等高分辨率卫星影像提取淤地坝坝地,获取黄土高原所有淤地坝坐标和面积等基础信息,再结合经验公式法确定淤地坝拦沙量,最后结合上述实测有机碳数据估算淤地坝碳储量,从而提供可供科研人员和政府职能部门使用的淤地坝碳汇核算基础数据库。

(4)借鉴淤地坝碳汇估算方法,全面核算水土保持碳汇效益。淤地坝所具有的保碳、减排、增汇的作用和能力,是通过这种措施所具有的保土、减蚀、土壤培育、作物及其他植物生长等水土保持作用与效益所发挥的固碳和增汇功能。推而广之,其他水土保持措

施,如分布较为广泛的梯田、水平沟、水土保持林地、南方红壤区的崩岗综合治理措施、东北黑土区侵蚀沟综合治理措施,以及生态清洁小流域建设,也都具有保土保碳、减蚀减排、增强土壤和植被碳汇的作用和能力。未来可参考借鉴淤地坝碳汇研究全面评估水土保持措施的碳汇效益,为水土保持碳汇指标核算以及双碳目标的实现提供科学依据。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查水土保持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.
- [2] Fang N F, Zeng Y, Ran L S, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau[J].Communications Earth and Environment,2023,4(1):65-74.
- [3] 李勇,白玲玉,黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J].水土保持学报,2003,17(2):1-4,19.
- [4] Wang Y F, Chen L D, Gao Y, et al. Carbon sequestration function of check-dams: A case study of the Loess Plateau in China[J].Ambio,2014,43(7):926-931.
- [5] Ran L S, Tian M Y, Fang N F, et al. Riverine carbon export in the arid to semiarid Wuding River Catchment on the Chinese Loess Plateau[J].Biogeosciences Discussions,2018,15(12):3857-3871.
- [6] Zeng Y, Fang N F, Shi Z H. Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese Loess Plateau[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2020,303:e107112.
- [7] Zhang H C, Liu S G, Yuan W P, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon[J].Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2016,121(6):1449-1455.
- [8] 王震,刘颖,杨明义,等.坝地剖面泥沙有机碳分解特征及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(10):2635-2643.
- [9] Zeng Y, Fang N F, Shi Z H, et al. Soil organic carbon redistribution and delivery by soil erosion in a small catchment of the Yellow River basin[J].Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2020,125(5):1-16.
- [10] 周仕轩,夏彬,郝旺林,等.黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究[J].水土保持学报,2022,36(4):284-289,298.
- [11] Lü Y H, Sun R H, Fu B J, et al. Carbon retention by check dams: Regional scale estimation[J].Ecological Engineering,2012,44:139-146.
- [12] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J].Environment International,2003,29(4):437-450.
- [13] Lugato E, Smith P, Borrelli P, et al. Soil erosion is unlikely to drive a future carbon sink in Europe[J].Science Advances,2018,4(11):e3523.
- [14] Yue Y, Ni J R, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2016,113(24):6617-6622.
- [15] Leithold E L, Blair N E, Perkey D W. Geomorphologic controls on the age of particulate organic carbon from small mountainous and upland rivers[J].Global Biogeochemical Cycles,2006,20(3):1-11.
- [16] Bouchez J, Beyssac O, Galy V, et al. Oxidation of petrogenic organic carbon in the Amazon floodplain as a source of atmospheric CO₂[J].Geology,2010,38(3):255-258.
- [17] 文雯,周宝同,汪亚峰,等.黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J].生态学报,2015,35(18):6060-6069.
- [18] 马安利.淤地坝增产效益监测分析[J].人民黄河,2012,34(10):92-93,96.
- [19] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon dioxide evolution in runoff from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils in southwestern Ohio[J].Soil and Tillage Research,2002,66(1):23-33.
- [20] Wang X, Cammeraat E L H, López C D, et al. Mineralization of eroded organic carbon transported from a loess soil into water[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(4):1362-1367.
- [21] Ran L, Lu X X, Xin Z. Erosion-induced massive organic carbon burial and carbon emission in the Yellow River Basin, China[J].Biogeosciences,2014,11(4):945-959.
- [22] 李智广,王楠,王英顺,等.大中型淤地坝安全度汛“四预”模型的重点主题及其算据[J].中国水利,2022(9):30-33.
- [23] Deng L, Liu S G, Kim D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program[J].Global Environmental Change,2017,47:13-20.
- [24] Zeng Y, Ran L S, Fang N F, et al. How to balance green and grain in marginal mountainous areas? [J].Earth's Future,2022,10(5):1-15.