

# 碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的 机理、途径及特征

李智广<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1</sup>, 王隽雄<sup>2</sup>

(1. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100055; 2. 黄河水利委员会 晋陕蒙接壤地区水土保持监督局, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** [目的] 瞄准中国碳达峰、碳中和目标及其时间表, 探索水土保持碳汇的主要途径与特征, 为全面提升水土保持碳汇能力, 科学推进水土流失综合治理高质量发展提供借鉴。[方法] 参考和借鉴国内外相关研究成果, 系统性地分析了水土保持碳汇的学科应用基础及其协同作用机理, 主要途径和物质表现, 总结提出了水土保持碳汇的主要特征。[结果] 水土保持碳汇作用是在植物措施、工程措施和耕作措施 3 大类水土保持措施的共同参与下, 通过植物、土壤和水体等多种途径协同发挥的, 可消减大气中 CO<sub>2</sub> 并将其转化为多种含碳化合物储存在植物及其产品、土壤和水体中。水土保持碳汇途径包括植物途径、土壤途径和水体途径。水土保持碳汇物质包括生物量、无生命有机质、土壤有机质和水体碳素。水土保持碳汇主要特征包括多种治理措施共同作用; 多种碳汇途径相互交织; 碳汇物质的现地性; 碳汇特征短历时碳汇明显, 全周期呈弱碳汇。[结论] 生态文明建设新阶段的水土保持工作, 应全面推行碳汇水土保持, 实施碳汇监测评价, 扩大高碳汇水土保持措施, 开展清洁生态小流域建设, 避免水土流失与其治理措施损毁导致的碳排放, 进一步提升碳汇增量, 巩固碳汇能力。

**关键词:** 水土保持; 碳达峰; 碳中和; 碳汇; 物质表现

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2022)03-0312-06

中图分类号: S157, Q148

**文献参数:** 李智广, 王海燕, 王隽雄. 碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的机理、途径及特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 312-317. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.039; Li Zhiguang, Wang Haiyan, Wang Junxiong. Mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation from perspective of carbon peak and carbon neutralization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 312-317.

## Mechanisms, Pathways and Characteristics of Carbon Sinks Related to Soil and Water Conservation from Perspective of Carbon Peak and Carbon Neutralization

Li Zhiguang<sup>1</sup>, Wang Haiyan<sup>1</sup>, Wang Junxiong<sup>2</sup>

(1. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China; 2. Soil and Water Conservation Supervision Bureau in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Border Area of YRCC, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** [Objective] The main mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation were explored from the perspective of carbon peak, carbon neutralization goals, and the schedule of Chinese national strategy objectives and goals in order to provide references for comprehensively improving the capacity of soil and water conservation to sequester carbon, and to scientifically promote the high-quality development of comprehensive control of soil and water losses. [Methods] Based on various soil and water conservation measures and their synergistic mechanisms, and referring to relevant research results

收稿日期: 2022-03-21

修回日期: 2022-04-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原坡面土壤侵蚀特征地带性变化及驱动机制”(42077071); 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(汉族), 陕西省岐山县人, 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、项目建设管理和科技研究等。Email: lizhiguang@mwr.gov.cn。

通讯作者: 王隽雄(1995—), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持监督管理与信息化建设研究。Email: yrcwjsx@163.com。

from home and abroad, the discipline application basis, basic mechanisms, three main pathways, and four kinds of material performance of soil and water conservation related to carbon sinks were systematically discussed and analyzed. Additionally, the main characteristics of soil and water conservation related to carbon sinks were identified. [Results] The role of soil and water conservation related to carbon sinks comes from the joint participation of three types of soil and water conservation measures: plant measures, engineering measures, and farming measures through a variety of pathways that include plants, soil, and water. These measures can reduce CO<sub>2</sub> in the atmosphere and convert it into a variety of carbon compounds for storage in plants and their products, in soil, and in water. The carbon sink pathways related to soil and water conservation include the plant pathway, the soil pathway, and the water pathway. Carbon sinks related to soil and water conservation include biomass, inanimate organic matter, soil organic matter, and water carbon. The main characteristics of soil and water conservation that affect carbon sinks include the joint action of a variety of control measures, the interweaving of a variety of carbon sink pathways, and the locality of carbon sink materials. The characteristics of carbon sinks are obvious over short time periods, and weak carbon sinks are clear over yearly cycles. [Conclusion] Soil and water conservation during this new period of ecological civilization construction should comprehensively promote soil and water conservation as a means of sequestering carbon, implement the monitoring and evaluation of carbon sinks, expand soil and water conservation measures that result in high carbon sinks, construct clean ecological small watersheds, avoid carbon emissions caused by soil erosion and damage control measures, further improve increment in carbon sinks, and consolidate the capacity of carbon sinks.

**Keywords:** soil and water conservation; carbon peak; carbon neutralization; carbon sink; material performances

近年来,中国高度重视应对全球气候变化,制定并实施积极应对气候变化国家战略,持续提高国家自主贡献力度。2021年9月22日,党中央、国务院印发《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》,为实现碳达峰、碳中和目标制定了“时间表”“路线图”。2021年10月24日,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,聚焦2030年前碳达峰目标,对推进碳达峰工作作出了总体部署,要求各地区、各部门和行业重点实施“碳达峰十大行动”,建立分领域、分行业碳达峰实施方案及保障方案,在“碳汇能力巩固提升行动”中提出加强退化土地修复治理,开展水土流失综合治理。科学地分析和评价水土保持碳汇的作用与能力,对建立水土保持碳汇监测核算指标体系和方法论,阐明水土保持对碳中和的贡献具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

近年来,学者们陆续研究了坡改梯<sup>[3]</sup>、淤地坝<sup>[4]</sup>、耕作措施<sup>[5]</sup>、保护性耕作<sup>[6-7]</sup>、免耕<sup>[8]</sup>、植物措施等多种水土保持措施对土壤碳库,综合治理对小流域生态系统固碳能力的作用<sup>[9]</sup>,结果发现各类治理措施可明显增加土壤有机质含量,并明显提高小流域生态系统固碳能力。但是,目前全面、系统性地阐述水土保持的碳汇作用与其特征的研究颇为少见。本研究基于各类水土保持措施及其协同作用机理,综合分析水土保持碳汇的主要途径、特征,旨在为高质量地实施水土保持措施提供参考。

## 1 水土保持碳汇的学科基础和作用机理

### 1.1 水土保持碳汇的学科基础

水土流失综合治理,遵循山水林田湖草沙综合治理、系统治理、源头治理,并针对治理区土壤侵蚀特征及其流失规律,因地制宜地实施各类预防和治理措施,合理调整土地利用结构,构建垂直方向多层次有机搭配,水平方向多类型综合配置的措施体系,调蓄地表径流,增加土壤水分,阻拦坡面土壤流失,保育土壤,促进林草生长发育,提高生物量,增加地表植被覆盖度,有效降低水土流失强度与面积,建设生态清洁小流域,改善农业生产条件,促进生态环境良性演替。水土保持碳汇就是建立在治理水土流失的工程措施、植物措施、耕作措施及其产生的调水蓄水保土效益等物质的基础上。

经过多年科学治理,中国水土保持措施的面积不断扩大,结构不断优化,效能日益显现。据第一次全国水利普查,2011年底全国存有水土保持措施面积 $9.92 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,其中梯田 $1.70 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,坝地 $3.38 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,其他基本农田 $2.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,水土保持乔木林 $2.98 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,灌木林 $1.14 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,经济果木林 $1.12 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,种草 $4.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,封禁治理 $2.10 \times 10^5 \text{ km}^2$ ;存有淤地坝58 445座,淤地面积 $9.28 \times 10^2 \text{ km}^2$ ,治沟骨干工程5 655座,已淤积 $2.35 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[10]</sup>。2012—2020年累计新增水土流失

治理面积  $5.23 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 其中水土保持基本农田  $4.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 水土保持林  $1.34 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 经济果木林  $5.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 种草  $3.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 封禁治理  $1.81 \times 10^5 \text{ km}^2$  [11]。水土保持措施年均可保持土壤  $1.60 \times 10^9 \text{ t}$  以上 [12]。

## 1.2 水土保持碳汇的作用机理

1.2.1 拦蓄泥沙, 保育土壤, 提升土壤碳汇能力, 增加土壤碳库容量 水土保持措施及其综合配置可以改善治理地块的微地形及其水、肥、气、热等条件, 调节地表径流, 减少土壤流失, 增加土壤养分水分, 优化土壤结构, 既减少了土壤流失导致的碳排放, 又增加了拦蓄保育土壤的碳储存, 更提升和稳定了土壤碳库的容量。研究表明: ①坡耕地改造为梯田后, 可使“三跑田”(跑水、跑土、跑肥)变为“三保田”(保水、保土、保肥), 进而使土壤碳库各组分随改造年份增加显著增加。在黄土高原丘陵沟壑区, 修建 30 a 的梯田, 有机碳、活性有机碳和非活性有机碳较坡耕地分别增加 146%, 196%, 100% [3]。②修建淤地坝在拦泥淤地, 控制水土流失, 促进作物增产的同时, 可掩埋沉积泥沙, 矿化深层土壤碳, 大幅提高土壤碳储量, 增加流域总碳储量, 40 a 多来淤地坝小流域碳库储存速率年均提高  $0.13 \sim 5.03 \text{ t/hm}^2$ , 平均为  $1.28 \text{ t/hm}^2$  [4]。③保护性耕作有利于增加农田土壤表层生物量, 降低土壤呼吸强度, 进而减少碳的损失; 有利于有机碳在土壤中的固持, 提高土壤有机碳密度 [6-8]。在南方红壤试验区, 纵坡间作、横坡间作、果园清耕等耕作措施实施 5 a 后, 表层土壤总有机碳质量分数增幅为 37.24%~66.34%, 土壤碳储量增幅为 35.23%~55.34% [5]。

1.2.2 植物措施吸收同化大气中的  $\text{CO}_2$ , 固碳储碳形成“绿碳” 在中国, 水土保持林、水土保持种草和经济果木林等 3 类植物措施占水土保持措施总面积的 42%~57%; 若计入封禁治理面积, 植物措施占水土保持措施总面积的比例达 75% 左右。植物措施通过光合作用吸收大气中的  $\text{CO}_2$  并固定在植物及其林下土壤当中, 具有很强的碳汇能力和较长的储碳期。据相关资料表明, 林木每生长  $1 \text{ m}^3$  蓄积量大约可以吸收  $1.83 \text{ t CO}_2$ , 释放  $1.62 \text{ t O}_2$  [13]。中国草地生物量碳密度为  $215.8 \sim 348.1 \text{ g/m}^2$  (以 C 计, 下同), 平均值为  $300.2 \text{ g/m}^2$ , 草地土壤有机碳密度为  $8.5 \sim 15.1 \text{ kg/m}^2$  [14]。在侵蚀劣地及其他退化土地上实施的水土保持林草, 碳汇能力提升更加显著。在黄土高原荒漠草原、丘陵典型草原、梁塬典型草原和草甸草原, 实施封禁 11 a 后草地活体植物、凋落物和根系的碳密度总量分别为  $706.6, 808.0, 1\ 531.9, 2\ 098.2 \text{ g/m}^2$ , 分别是退化草地的 14.8, 8.33, 6.5, 15.88 倍 [15]。

1.2.3 建设生态清洁小流域, 减少碳排放, 增加碳汇量, 实现零排放 生态清洁小流域建设, 将水资源保护、农村垃圾和污水处理、农田化肥和农药使用等一体化管理, 构筑生态修复、生态治理和生态保护“三道防线”, 实现水源可保护可涵养、水体清洁水质达标、生态系统良性演替、产业发展结构优化 [16-18]。水土流失综合治理体系中, 各种措施相互耦合、协同联动, 促进物质流、养分流和水分流等物质在植物、土壤直到土体深层不断聚集 [19], 提升小流域生态系统的碳汇能力; 面源污染减量化措施体系, 控制化肥、农药和地膜等污染物使用量, 推行农作物秸秆综合利用和畜禽粪污资源化利用, 推广有机农业, 减少化石能源消耗, 推进小流域碳减排; 沟道河岸库滨整治与湿地恢复, 杜绝人为采挖破坏, 保护河岸和河道, 清淤疏浚河道, 涵养河湖库池, 净化水体美化环境。至 2020 年, 北京市已实施生态清洁小流域 466 条, 充分发挥了减少土壤流失、涵养水源、控制面源污染、增加碳汇的多重作用 [20]。中国科学院在鹰潭红壤生态试验站的研究表明, 在侵蚀裸地集水区采用快速植物恢复技术, 2~3 a 初步实现坡面绿化, 30 a 已形成稳定的乔灌草立体结构, 土壤碳密度达  $47.92 \text{ t/hm}^2$ , 乔木层、灌木层、枯枝落叶层和草本层的碳密度分别达 80.97, 6.92, 2.85, 0.33  $\text{t/hm}^2$ , 相较于试验初期退化裸地发生了巨大变化 [9]。

## 2 水土保持碳汇的主要途径与物质表现

### 2.1 水土保持碳汇主要途径

水土保持碳汇途径主要包括植物碳汇、土壤碳汇和水体碳汇等 3 种 [21-22]。基于刘宝元等提出的“中国水土保持措施分类系统” [23], 经去除不直接发生碳汇作用的措施, 合并碳汇途径相同的同类措施, 提出水土保持碳汇的主要途径与措施类型的对应关系如图 1 左侧所示。

2.1.1 植物碳汇途径 植物途径发生碳汇作用是通过植物的光合作用, 吸收同化空气中的  $\text{CO}_2$  形成纤维素  $[(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n]$  等有机质, 储存在植物的干枝茎叶根当中, 进而扩展到地表土壤和深层土体当中, 提升生态系统碳吸收汇的速度和能力。

水土保持植物碳汇途径涉及的治理措施主要包括: 造林、种草、封育、生态修复、植物护路等植物措施以及促进林草和农作物生长发育的梯田、水平阶、草田轮作、横坡带状间作、休闲地绿肥等工程措施和耕作措施。进一步细分, 这些水土保持措施涉及多种多样实施和配置的方式, 包括: 人工种植和飞机播种的

乔木林、灌木林和草本植物,封禁恢复的乔木林、灌木林和草本植物,人工种植的经济果木林,种植在农田上用以阻断径流的植物篱,种植在田块四周用以防风的防护林,栽植在村旁宅旁路旁水旁的“四旁林”,种

植在沟底和道路两侧用以防止沟蚀的草本植物(草水路),种植在开挖面和堆积体上用以防止土壤流失的植物,作物及与其轮作和间作的牧草、绿肥,在梯田和水平阶上种植的农作物。

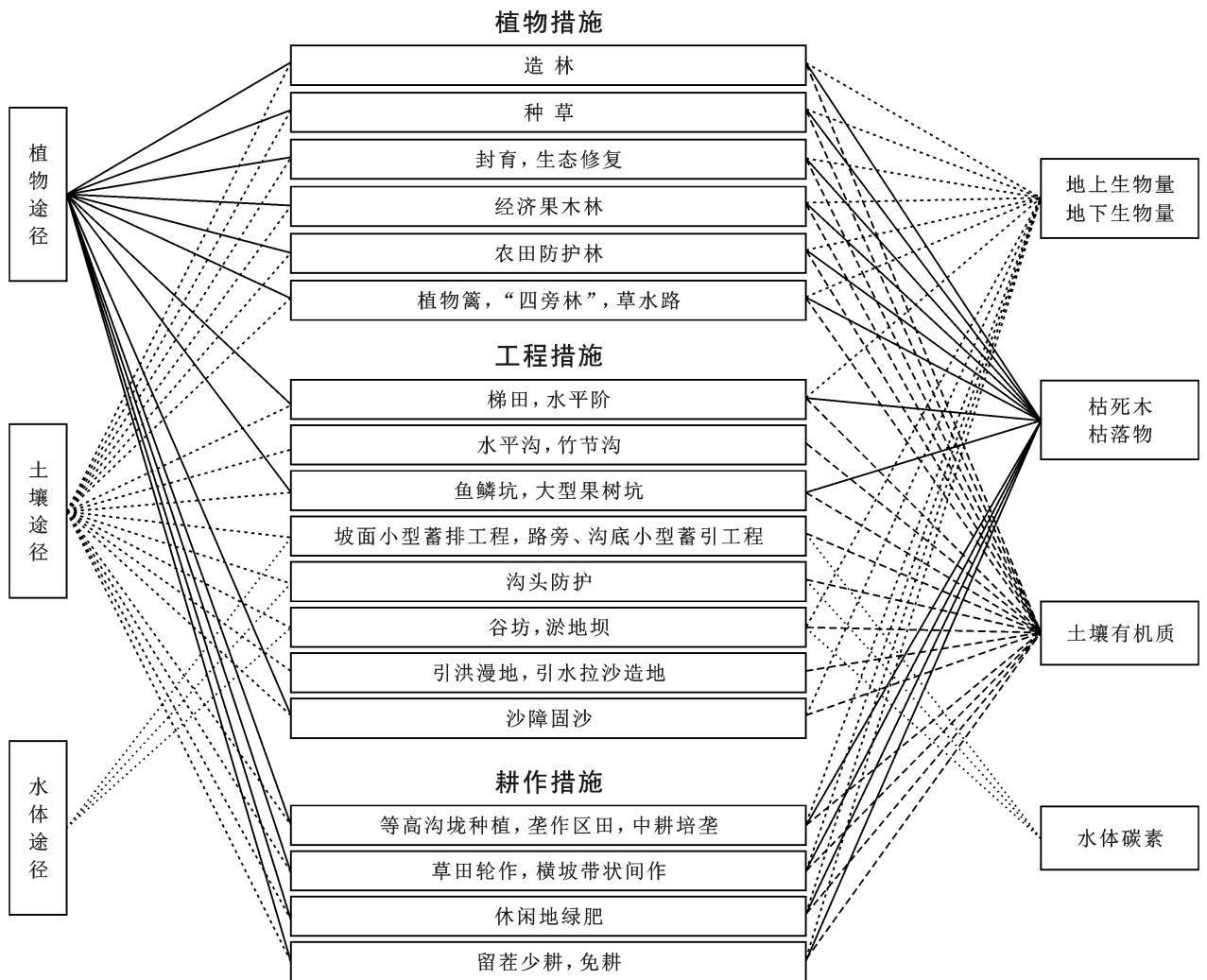


图 1 水土保持碳汇途径和实物与水土保持措施的对对应关系

2.1.2 土壤碳汇途径 土壤途径发生碳汇作用主要是通过各种水土保持措施的蓄水、保土和改善土壤等效益产生固碳增汇。①减少或防止土壤流失,保护现有土壤碳素流失,巩固土壤固碳能力;②林草的凋落物、还田的作物秸秆、翻压的绿肥和根系分泌物,向地表输入有机物质,提升表层土壤有机碳含量和土体深层碳素含量,提高土壤碳汇增量。

水土保持土壤碳汇途径涉及的治理措施主要包括:造林、种草、封育、生态修复、植物护路等植物措施,鱼鳞坑、大型果树坑等造林整地措施,梯田、水平阶、水平沟、竹节沟、沟头防护、谷坊、淤地坝、引洪漫地、引水拉沙造地、沙障固沙等工程措施,等高沟垄种植、垄作区田、陶钵种植、抗旱丰产沟、中耕培垄、草田

轮作、横坡带状间作、休闲地绿肥、留茬少耕和免耕等耕作措施。进一步细分,这些水土保持措施涉及多种多样实施和配置的方式,除植物碳汇途径中能够发生土壤碳汇的植物措施外,还包括在沟底修筑的土谷坊、石谷坊、植物谷坊,在沟壑修筑的淤地坝,引洪水漫淤的耕地或荒滩,在风沙区引水拉沙淤出的耕地,在沙地营造的柴草沙障、卵石沙障和植物沙障,在坡耕地上的等高耕作、区田耕作、等高挖沟及少耕、免耕。

2.1.3 水体碳汇途径 水体途径发生碳汇作用主要是通过工程措施拦蓄、储存的水体和泥沙吸收 CO<sub>2</sub>, 积存有机物质增加碳汇。①水体本身吸收和溶解 CO<sub>2</sub>, 水体中的浮游植物等水生生物光合作用吸收同化 CO<sub>2</sub>; ②拦蓄积存的有机物质改变底泥植物组成,

促进底泥碳循环,形成沉积物有机质,实现碳素埋藏<sup>[24]</sup>,提升碳汇增量和总容量。

水土保持水体碳汇途径涉及的治理措施主要包括:坡面小型蓄排工程,路旁、沟底小型蓄引工程、沟头防护、谷坊和淤地坝等。进一步细分,这些水土保持措施涉及多种多样实施和配置的方式,包括:坡面上的截水沟、排水沟、蓄水池和沉砂池,修筑在村旁路旁用以阻缓径流,防止冲刷,汇集雨水的蓄水设施(涝池、蓄水池等),修筑在沟壑中用以拦泥淤地,减轻沟蚀的淤地坝。

## 2.2 水土保持碳汇主要物质表现

上述水土保持碳汇途径必然消减空气中的  $\text{CO}_2$ , 并通过同化、化合等过程生成了有机的、无机的物质。这些水土保持碳汇实物主要包括生物量(地上生物量和地下生物量)、无生命有机质(枯死木和枯落物)、土壤有机质、水体碳素等 4 种类型(与水土保持措施的对对应关系如图 1 右侧部分所示)。

**2.2.1 生物量** 生物量是指通过水土保持措施产生的、所有草本和木本活体有机质,分为地上生物量和地下生物量。地上生物量指土壤以上的活体生物量,地下生物量指活根的全部生物量(直径不足 2 mm 的细根不计入)。

**2.2.2 无生命有机质** 无生命有机质是指通过水土保持措施产生的、已脱开草本和木本活体的无生命有机质,分为枯落物和枯死物。枯落物是指存在于土壤中、已死亡和腐朽状况的、直径 2~10 cm 的所有非活生物量,主要包括枯枝和落叶。枯死物包括不包含在

枯落物中的所有非活生物量,即直径大于 10 cm 的非活性生物量,无论直立、横卧在地面上或土壤中。

**2.2.3 土壤有机质** 土壤有机质是指通过水土保持措施产生于土壤中,经微生物分解与合成的各种有机物质,主要包括碳水化合物、含氮化合物、木质素、脂溶性物质及直径小于 2 mm 植物细根和无生命有机质。

**2.2.4 水体碳素** 水体碳素是指通过水土保持措施产生的溶解无机碳、溶解有机碳和颗粒有机碳。溶解无机碳指来源于大气  $\text{CO}_2$  溶解于水形成的溶解无机物,包括  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  和  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  等碳酸盐物质。溶解有机碳指经过土壤淋洗、水流汇集和生物活体分泌形成的溶解态有机物质中的碳,包括碳水化合物、氨基酸类、烃和卤代烃和维生素类等。颗粒有机碳指来源于死亡生物残体和活体生物,包括凋落物、草根层、腐殖质、泥炭和腐泥等含碳有机物。

## 3 水土保持碳汇的主要特征

基于上述阐述和分析可知,水土保持碳汇具有多种治理措施共同作用,多种碳汇途径相互交织,碳汇物质的局地性,短历时碳汇明显,全周期呈弱碳汇等 4 个基本特征。

(1) 多种治理措施共同作用。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、植物措施和耕作措施相互结合、有机搭配、综合配置。多种类型、多样结构的措施共同参与、共同作用,充分发挥着水土保持措施碳汇作用(如图 2 所示)。

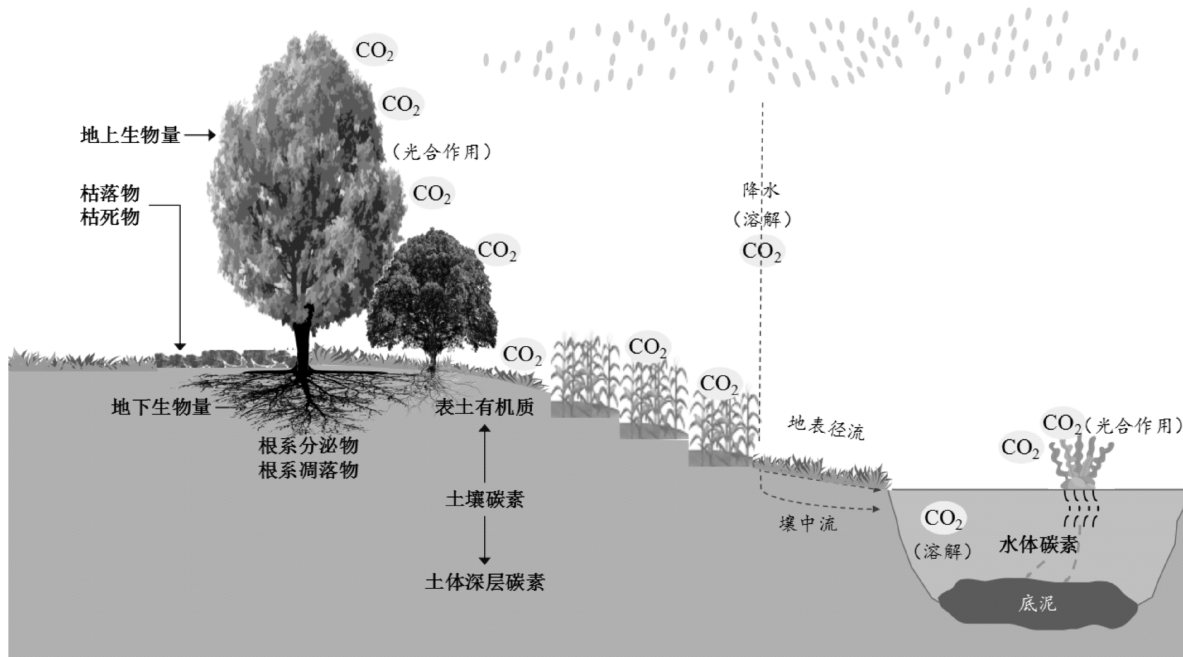


图 2 水土保持措施碳汇作用过程示意图

(2) 多种碳汇途径相互交织。水土保持碳汇产生于植物措施生长的林草与作物,工程措施蓄积的水体,各类措施拦蓄和保育的土壤。其中不断地发生着吸收、同化、矿化  $\text{CO}_2$  的物理、生物、化学的过程。这就确定了水土保持碳汇具有多种途径相互作用特征。

(3) 碳汇物质的局地性。水土保持措施总是实施、生长和发育在确定的地块上和确定的项目区,所产生的调水、保水、保土、效益及其碳汇物质也在确定的范围内。这就决定了水土保持碳汇物质具有局地性。

(4) 短历时碳汇明显,全周期呈弱碳汇。限于自然环境禀赋和经济社会条件,在各地乃至整个生态系统中,能够实施的水土保持措施数量存在极限,其质量和功能也存在上限。植物措施有发生、发育与演替的顶级群落,工程措施有确定的设计标准(或抗洪能力限度),耕作措施只是种植作物的技艺方法,各类措施的碳汇能力就必然存在极限。因此,各种途径水土保持碳汇的作用呈现短历时明显碳汇,全周期弱碳汇的时效性特征。即在较短时段,如一年、几年或数年的植物旺盛生长期、小型工程蓄水期和工程措施效益发挥期,各种措施均有明显减低碳排放和碳吸收汇作用;从长周期看,如植物措施的全生命周期(草本 1 年或多年,林木大多数几十年),生长发育期是碳吸收汇,枯死凋谢腐烂时是碳排放源,其碳循环基本为气候碳中性<sup>[25-26]</sup>。

## 4 结论

本文基于各类水土保持措施及其配置体系,参考相关文献,系统地探讨了水土保持碳汇的物质基础、作用机理、主要途径及其对应的实物,总结了水土保持碳汇的主要特征,对进一步开展水土保持碳汇监测评价,推动实施碳汇水土保持具有一定的指导意义。

(1) 水土保持碳汇具有多措施共同作用,多途径相互交织的特征,在水土保持工作中,应根据工程措施、植物措施和耕作措施以及工程规格、林草品种、耕作工艺的特点,设计、配置好各类措施的数量、种类及其空间结构,保证各类措施能够持续、高效地发挥碳汇作用,巩固和提升生态系统的碳汇能力。

(2) 水土保持碳汇具有短历时碳汇明显,全周期呈弱碳汇的特征。在水土流失综合治理中,应不断地优化措施类型及其结构,促进各类措施多种途径向着更持久、最根本的碳汇途径转换,增强水土流失综合防治功能,提高水土保持碳汇效能。应根据植物措施、工程措施全生命周期及其各阶段的特征,做好维

护管理和及时更新更替,促进林草、土壤、水体和土体等多种碳汇途径功能充分发挥,持续协同作用。

(3) 水土保持碳汇具有碳汇能力的极限性特征和物质表现的局地性特征,在水土保持率现状与阈值差距较大的地区,应多措并举,多实施、实施好治理措施,扩大高碳汇水土保持措施;在水土保持率现状与阈值差距较小的地区,应着力提升水土保持措施质量和功能,更加注重提高碳汇作用及其物质累积,保障区域碳汇能力不断增强、碳汇物质持续增加。

(4) 根据水土保持碳汇物质表现的局地性特征,在水土保持措施实施较好,且实施多的区域,水土保持碳汇的增量更大,能力更强,具有更多的,且不断增加的碳汇物质,具备更早实现碳中和的潜力。碳汇物质更多水土保持工程区为开展核证自愿减排量交易提供了可能和场景,为水土保持碳汇项目参与全国碳排放权交易提供“碳票”“碳资产”<sup>[27]</sup>。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陆桂华.勇于担当 主动作为 谱写水土保持工作新篇章[J].中国水土保持,2021(4):1-4.
- [2] 水利部办公厅.水利部办公厅关于印发 2022 年水土保持工作要点的通知;办水保〔2022〕24 号[R].2022-1-28.
- [3] 戴全厚,刘国彬,薛蕙,等.侵蚀环境坡耕地改造对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J].水土保持通报,2008,28(4):17-21.
- [4] 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.
- [5] 郑海金,杨洁,汤崇军,等.不同水土保持耕作措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J].水土保持通报,2011,31(6):1-4,10.
- [6] 陈庆,李长江,张俊丽,等.保护性耕作农田固碳减排效应分析:以陕西户县、大荔和临渭区为例[J].西北农业学报,2016,25(11):1686-1695.
- [7] 王碧胜.长期保护性耕作土壤团聚体有机碳转化过程及机制[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [8] 张四海,曹志平,张国,等.保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响[J].生态环境学报,2012,21(2):199-205.
- [9] 顾亚兰.第四纪红黏土区侵蚀劣地生态恢复 30 年前后的环境效应研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [10] 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.
- [11] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2012—2020)[B].2012-2020.
- [12] 水利部水土保持司.水土保持 70 年[J].中国水土保持,2019(10):3-7.
- [13] 贾治邦.发展林业:应对气候变化的战略选择[J].求是,2010(7):54-56.

地面积,遏制耕地面积的持续扩张,积极实施退耕还林政策,增加林地面积。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 雷学军.二氧化碳是人类的宝贵财富[J].中国能源,2016,38(1):12-21.
- [2] Quéré L C, Andrew M R, Friedlingstein P, et al. Global Carbon Budget 2017 [J]. Earth System Science Data, 2018,10:405-448.
- [3] 莫惠斌,王少剑.黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J].地理科学,2021,41(8):1324-1335.
- [4] 邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J].管理世界,2019,35(1):36-60.
- [5] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J].地理学报,2021,76(12):3103-3118.
- [6] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.
- [7] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones W M, et al. Global Carbon Budget 2020 [J]. Earth Syst. Sci. Data, 2020, 12:3269-3340.
- [8] Nijdam D, Rood T, Westhoek H. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes [J]. Food Policy, 2012,37(6):760-770.
- [9] Ishii S, Tabushi S, Aramaki T, et al. Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public buildings in Utsunomiya, Japan [J]. Energy Policy, 2010,38(9):4888-4896.
- [10] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].生态学报,2016,36(22):7244-7259.
- [11] 王芳.重庆市土地利用变化及其碳排放效应研究[D].重庆:重庆师范大学,2017.
- [12] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等.江苏省 1996—2007 年碳排放效应及时空格局分析[J].资源科学,2010,32(4):768-775.
- [13] 黄思雅.福建省土地利用变化碳排放效应研究[D].福建福州:福建师范大学,2019.
- [14] 刘英,赵荣钦,焦士兴.河南省土地利用碳源/汇及其变化分析[J].水土保持研究,2010,17(5):154-157.
- [15] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].地理科学,2019,39(12):1955-1961.
- [16] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等.过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J].中国科学(地球科学),2008,38(2):197-210.
- [17] 姜蔚.新疆塔城地区农村居民参与人居环境治理意愿与行为研究[D].新疆石河子:石河子大学,2021.
- [18] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].中国科学(地球科学),2022,52(6):1010-2020.
- [19] Fu Bojie, Li Bengang, Gasser T, et al. The contributions of individual countries and regions to the global radiative forcing [J]. PNAS, 2021,118(15). <https://doi.org/10.1073/pnas.2018211118>.
- [14] 方金云,杨元合,马文红,等.中国草地生态系统碳库及其变化[J].中国科学(生命科学),2010,40(7):566-576.
- [15] 程积民,程杰,杨晓梅,等.黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J].生态学报,2012,32(1):226-237.
- [16] 杨进怀.北京市生态清洁小流域与美丽乡村建设[J].中国水利,2014(20):18-20.
- [17] 北京市质量技术监督局. DB 11/T 548-2008 生态清洁生态小流域技术规范[S].北京,2008.
- [18] 中华人民共和国水利部. SL 534-2013 生态清洁生态小流域建设技术导则[S].北京,2013.
- [19] 孟庆华,傅伯杰.景观格局与土壤养分流动[J].水土保持学报,2000,14(3):116-121.
- [20] 北京市水务局. 2020 年北京市水土保持公报[EB/OL](2021-09-02)[2022-03-20]. <http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/stbcgb/202109/P020210902621395664208.pdf>.
- [21] 李姝,喻阳华,袁志敏,等.碳汇研究综述[J].安徽农业科学,2015,43(34):136-139.
- [22] 余新晓,贾国栋,郑鹏飞.碳中和的水土保持实现途径和对策[J].中国水土保持科学,2021,19(6):138-144.
- [23] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施类型[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [24] 陈毅凤,张军,万国江.贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J].湖泊科学,2001,13(1):15-20.
- [25] 未来 100 年中国陆地生态系统仍是弱碳汇[EB/OL](2008-03-24)[2022-03-20]. [https://www.cas.cn/xw/kjss/gndt/200906/t20090608\\_651668.shtml](https://www.cas.cn/xw/kjss/gndt/200906/t20090608_651668.shtml).
- [26] 王伟.欧洲现有森林或许已达到碳汇能力的极限[EB/OL](2013-08-31)[2022-03-20]. <http://www.tanpaifang.com/tanhui/2013/0831/23655.html>.
- [27] 全国人大代表、三明市委书记余红胜.建议大力发展林业碳汇推动生态产品价值实现[EB/OL](2022-03-10)[2022-03-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1726875332731480557&wfr=spider&for=pc>.

(上接第 317 页)