

# 水土保持碳汇作用的生态学机制

周红芬 王跃兵

昆明有色冶金设计研究院股份公司 云南 昆明 650221

**摘要:** 水土保持是防治水土流失、改善生态环境的核心举措,同时也是提升陆地生态系统碳汇能力、应对全球气候变化的重要路径。其碳汇作用依托生态系统碳循环过程,通过各类水土保持措施调控植被、土壤、水文等关键生态要素,实现碳输入增加与碳输出减少的协同平衡。本文基于生态系统碳循环理论,系统梳理水土保持与碳循环的生态学基础,重点剖析植被恢复、土壤改良、水文调节三大水土保持措施的碳汇生态学机制,探讨多尺度协同机制的运行规律,提出促进碳汇作用发挥的针对性策略,为深化水土保持碳汇理论研究、优化水土保持措施配置、推动生态保护与碳增汇协同发展提供实践支撑,助力“双碳”目标落地见效。

**关键词:** 水土保持; 碳汇; 生态学机制; 植被恢复; 土壤有机碳; 水文调节

引言: 全球气候变化下,碳减排与碳增汇是应对核心,陆地生态系统碳汇是提升总量的关键。我国水土流失面积大,不仅破坏土壤、恶化环境,还干扰碳循环、加剧碳流失,制约碳汇能力提升。水土保持措施能防治流失,发挥碳汇效应。当前学界对其效应量化研究多,但内在生态学机制及多尺度协同规律研究不深,影响功能发挥。本文聚焦此,梳理理论、剖析机制,提出优化策略以供参考。

## 1 水土保持与碳循环的生态学基础

### 1.1 生态系统碳循环过程

生态系统碳循环是碳在大气、植被、土壤、水文之间的迁移与转化过程,核心包括碳输入、碳储存与碳输出三个环节,构成完整的碳循环闭环。碳输入主要依赖植被光合作用,绿色植物通过叶绿体吸收大气中的二氧化碳,将其转化为有机碳,积累于植被生物量中,是生态系统碳汇形成的核心来源。碳储存主要发生在植被与土壤中,植被通过生物量积累储存有机碳,土壤则通过有机碳与无机碳的固持形成土壤碳库,其中土壤有机碳占陆地生态系统碳储存总量的60%以上。碳输出主要包括植被与土壤的呼吸作用、枯落物分解作用,以及水土流失、水文径流导致的碳流失,各环节相互制约、相互平衡,维持生态系统碳循环的稳定性,为水土保持碳汇作用的发挥奠定基础。

### 1.2 水土流失对碳循环的干扰

水土流失是干扰生态系统碳循环、降低碳汇能力的关键因素,主要通过破坏碳储存载体、加剧碳输出实现。水土流失会直接冲刷地表植被,破坏植被群落结构,导致植被覆盖度下降,光合作用减弱,碳输入量显著减少,同时植被残体被径流带走,无法归还土壤形成

有机碳<sup>[1]</sup>。此外,水土流失会侵蚀表层土壤,破坏土壤团聚体结构,导致土壤有机碳暴露于空气中,加速分解速率,增加土壤碳呼吸输出;同时,侵蚀泥沙携带大量土壤有机碳进入水文系统,随径流迁移流失,进一步减少土壤碳储存量。研究表明,严重水土流失区域的土壤有机碳流失速率比无水土流失区域高30%-50%,显著打乱碳循环平衡,加剧区域碳失衡。

### 1.3 水土保持的碳汇潜力

水土保持通过调控水土流失过程、修复受损生态系统,具备巨大的碳汇潜力,是提升陆地生态系统碳汇能力的重要途径。水土保持措施可通过植被恢复、土壤改良等过程,增加碳输入、减少碳输出,实现碳汇积累。从植被碳汇来看,人工造林、退耕还林还草等措施可快速提升植被覆盖度,增加植被生物量碳积累,我国退耕还林还草工程实施以来,累计新增植被碳汇超10亿吨。从土壤碳汇来看,梯田、覆盖耕作等措施可减少土壤侵蚀,促进植被枯落物分解与转化,增加土壤有机碳固持,每公顷水土保持工程年均可增加土壤有机碳0.5-1.2吨。不同区域水土保持碳汇潜力存在差异,黄土高原、南方红壤区等水土流失严重区域,经过综合治理后,碳汇潜力提升更为显著。

## 2 水土保持措施的碳汇生态学机制

### 2.1 植被恢复的碳汇机制

植被恢复是水土保持措施中碳汇效应最直接的机制,核心通过提升植被光合固碳能力、优化群落结构,实现碳输入增加与碳储存稳定。水土保持中的植被恢复措施的合理配置乔灌草群落,提升植被覆盖度与群落多样性,延长植被生长周期,增强光合作用效率,增加有机碳输入量。植被群落的优化可提升植被抗干扰能力,

减少植被死亡与枯落物流失，促进枯落物归还土壤，为土壤碳汇提供物质基础。此外，植被根系可改善土壤结构，促进土壤微生物增殖，加速枯落物分解与有机碳转化，提升土壤碳固持能力，形成“植被光合固碳—枯落物归还—土壤碳储存”的协同碳汇机制，推动植被碳汇与土壤碳汇同步提升。

### 2.2 土壤改良的碳汇机制

土壤改良是水土保持碳汇作用的核心载体，主要通过减少土壤碳流失、促进土壤有机碳固持，实现土壤碳汇积累。水土保持工程措施与农业措施可有效减少土壤侵蚀，降低土壤有机碳随泥沙流失的速率，保护表层肥沃土壤，减少土壤有机碳暴露分解。同时，秸秆还田、覆盖耕作等措施可增加土壤有机质输入，秸秆中的有机碳经微生物分解转化为土壤有机碳，提升土壤有机碳含量。此外，水土保持措施可改善土壤理化性质，促进土壤团聚体形成，土壤团聚体可将土壤有机碳包裹其中，避免其被微生物分解，提升土壤有机碳的稳定性，延长碳储存周期，进一步增强土壤碳汇能力，实现土壤碳汇的长期积累<sup>[2]</sup>。

### 2.3 水文调节的碳汇机制

水文调节是水土保持碳汇作用的重要补充机制，核心通过调控水文过程，减少碳流失、促进碳固持。水土保持措施中的梯田、鱼鳞坑、淤地坝等工程，可减缓地表径流速度，截留部分径流，减少径流携带的泥沙与有机碳流失，降低水文过程中的碳输出。同时，水文调节可改善区域水分条件，提升土壤含水量，为植被生长与微生物活动提供适宜环境，促进植被光合作用与微生物固碳作用，增加碳输入。此外，淤地坝等措施可促进泥沙淤积，淤积泥沙中的有机碳被长期封存，形成稳定的碳储存库，同时淤积区域可逐步恢复植被，进一步提升碳汇能力，实现水文调节与碳汇作用的协同推进。

## 3 水土保持碳汇作用的多尺度协同机制

### 3.1 生态系统尺度

生态系统尺度是水土保持碳汇作用的基础尺度，核心体现为植被-土壤-微生物-水文的协同碳汇过程。在该尺度下，水土保持措施通过植被恢复提升光合固碳能力，植被枯落物归还土壤后，经微生物分解转化为土壤有机碳，土壤改良措施促进土壤有机碳固持，水文调节措施减少碳流失，形成完整的碳汇协同体系。各生态要素相互作用、相互调控，植被为土壤提供有机碳输入，土壤为植被与微生物提供生长环境，微生物调控有机碳转化，水文调节维持系统水分平衡，共同推动碳汇积累。生态系统尺度的碳汇协同机制，决定了水土保持碳汇的基础能力与稳定性，是

多尺度协同机制的核心支撑。

### 3.2 景观尺度

景观尺度的水土保持碳汇协同机制，核心体现为不同景观类型的碳汇功能互补与空间协同。景观尺度下，水土保持措施通过优化景观格局，合理配置林地、草地、梯田、水域等景观类型，实现不同景观的碳汇功能协同提升。林地与草地作为主要碳汇景观，承担主要的光合固碳与土壤碳固持功能；梯田通过减少土壤侵蚀，提升农田碳汇能力；水域通过水文调节，减少区域碳流失。不同景观类型之间通过物质循环与能量流动实现协同，如林地枯落物经径流迁移至梯田，提升梯田土壤有机碳含量，形成景观间碳汇协同效应，进一步提升区域整体碳汇能力。

### 3.3 区域尺度

区域尺度的水土保持碳汇协同机制，核心体现为区域内不同区域、不同水土保持措施的碳汇协同，以及与区域气候、土壤等自然条件的适配性。区域尺度下，不同区域根据自身水土流失特征与自然条件，实施差异化水土保持措施，形成区域碳汇协同体系。如水土流失严重区域重点实施植被恢复与工程措施，提升碳汇潜力；农田区域重点实施农业水土保持措施，优化农田碳汇<sup>[3]</sup>。区域内不同措施的碳汇效应相互补充，工程措施短期减少碳流失，生物措施长期增加碳输入，形成短期与长期协同的碳汇格局。另外，区域尺度的碳汇协同机制还受气候、土壤等自然条件调控，实现水土保持碳汇与区域生态环境的协同发展。

## 4 促进水土保持碳汇作用发挥的策略

### 4.1 加强水土保持碳汇基础研究

加强水土保持碳汇基础研究，是推动碳汇作用高效发挥的理论支撑。重点开展水土保持碳汇的微观生态学机制研究，深入剖析微生物介导的碳转化过程、土壤有机碳固持的微观机理，明确不同水土保持措施的碳汇调控路径。同时，加强不同区域、不同气候条件下水土保持碳汇机制的对比研究，梳理区域差异特征，构建差异化碳汇理论体系。另外，推动跨学科融合研究，结合生态学、土壤学、水文科学、气象学等多学科理论，完善水土保持碳汇理论框架，为碳汇措施优化提供科学依据，破解当前碳汇机制研究不深入的难题。

### 4.2 完善水土保持碳汇监测体系

完善的监测体系是精准掌握水土保持碳汇动态、科学优化措施配置的关键所在。构建“地面监测 + 遥感监测 + 实验室分析”三位一体的监测体系势在必行。在典型水土保持区域合理设置监测站点，这些站点如同碳汇

监测的“前哨站”，重点监测植被碳储量、土壤有机碳含量、碳转化速率、水土流失碳流失量等核心指标。利用遥感技术，能够实现对区域尺度水土保持碳汇的动态监测，其具有监测范围广、效率高的优势，可及时捕捉碳汇的变化情况，大大提升了监测的覆盖面。而实验室分析则凭借其精准的仪器设备和专业的分析方法，能够精准量化碳汇相关指标，确保监测数据的准确性和可靠性。建立碳汇监测数据共享平台至关重要，它打破了各部门、各区域之间的数据壁垒，实现监测数据的互联互通。通过这个平台，科研人员、决策者等可以方便地获取所需数据，为碳汇评价、措施优化提供有力的数据支撑，推动碳汇监测朝着规范化、常态化的方向发展。

#### 4.3 推动水土保持碳汇纳入碳交易市场

推动水土保持碳汇纳入碳交易市场，是激发碳汇发展内在动力、实现碳汇价值有效转化的重要路径。当前，要完善水土保持碳汇核算标准与方法，明确碳汇核算的各项指标、详细流程以及关键参数，确保核算过程科学、规范，核算结果准确、可靠，符合碳交易市场的严格要求。建立水土保持碳汇项目申报、审核、备案机制，规范整个项目管理流程，从项目的提出、审核到最终备案，都要有严格的标准和程序，保证每一个纳入碳交易市场的水土保持碳汇项目都具有高质量和可信用度<sup>[4]</sup>。出台碳汇激励政策，通过税收优惠、财政补贴等方式，鼓励企业、社会组织积极参与水土保持碳汇项目建设。企业和社会组织可以通过参与项目建设获得碳汇指标，并在碳交易市场上进行交易，实现碳汇价值变现，这不仅拓宽了水土保持的资金来源渠道，还能推动水土保持碳汇朝着产业化方向发展，形成可持续发展的良好局面。

#### 4.4 加强宣传教育，提高公众意识

公众参与是推动水土保持碳汇作用持续发挥的坚实社会基础，加强宣传教育、提升公众意识刻不容缓。利用广播电视、网络媒体、宣传栏等多种渠道，全方位、多层次地宣传水土保持碳汇的重要意义、生态学机制以

及相关政策。广播电视可以通过专题节目、公益广告等形式，将碳汇知识传递给广大观众；网络媒体则具有传播速度快、覆盖面广的特点，能够及时发布最新的碳汇研究成果和政策动态；宣传栏可以设置在社区、学校等人员密集场所，以图文并茂的方式普及碳汇知识，让公众了解水土保持与碳增汇、气候变化之间的密切关联。开展科普宣传活动，组织专业人员走进社区、乡村、学校，举办讲座、展览等活动，与公众进行面对面的交流和互动，提升公众的生态环保意识与碳汇认知水平。鼓励公众监督水土保持项目实施，形成“政府主导、企业参与、公众监督”的良好氛围，为水土保持碳汇发展提供强大的社会支撑。

#### 结束语

水土保持碳汇作用是生态系统碳循环与水土保持过程协同作用的重要体现，其核心依托植被恢复、土壤改良、水文调节三大生态学机制，通过多尺度协同运行，实现碳输入增加与碳输出减少，为应对全球气候变化、推动“双碳”目标实现提供重要支撑。未来需进一步加强基础研究与技术创新，完善监测与激励机制，推动水土保持碳汇功能高效发挥。通过科学的措施配置与全社会共同参与，水土保持将在生态保护与碳增汇中发挥更大作用，助力构建人与自然生命共同体。

#### 参考文献

- [1] 李小燕,李智广,成辉,等.水土保持碳汇作用的生态学机制[J].福建师范大学学报(自然科学版),2025,41(1):53-58.
- [2] 孟天友,宁茂岐,江河,等.水土保持碳汇交易的贵州实践——以西南地区首单水土保持碳汇交易为例[J].中国水土保持,2025(3):9-11.
- [3] 张西宁,曹丹,李超,等.南小河流域水土保持碳汇能力评估研究[J].人民黄河,2025,47(3):117-122.
- [4] 丁宏宇,李亚波,吴占华,等.国内水土保持措施碳汇研究进展综述[J].水土保持应用技术,2025(2):62-64.