

DOI: 10.20103/j.stxb.202209022509

杨阳,张萍萍,吴凡,周媛媛,宋怡,王云强,安韶山.黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策.生态学报,2023,43(21):9071-9081.

Yang Y, Zhang P P, Wu F, Zhou Y Y, Song Y, Wang Y Q, An S S. The significance and countermeasures of vegetation construction on the Loess Plateau to carbon neutrality. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 9071-9081.

黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策

杨 阳^{1,2}, 张萍萍^{1,2}, 吴 凡^{1,2}, 周媛媛^{1,2}, 宋 怡^{1,2}, 王云强^{1,2,*}, 安韶山³

1 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

3 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要:黄土高原是我国“一带一路”建设的倡议地和天然的西部生态屏障,在“黄河高质量发展”和“双碳战略目标”重大国家战略背景下,黄土高原生态系统碳汇效应将迎来重大的转机和严峻的挑战。首先回顾了黄土高原植被建设的背景与历程,然后概括和总结了植被建设过程中固碳效应,针对黄土高原生态系统碳固定和排放过程,提出了一系列的增碳减排措施和对策,包括优化黄土高原植被建设和管理模式,加强科技顶层设计,提升植被建设的碳汇能力,并加快退耕还林/草的“碳交易”市场建设,健全法规规章标准和碳统计监测体系等;最后,对植被建设后期可能出现的问题和挑战进行了展望,为黄土高原乃至全国陆地生态系统实现“碳中和”战略目标提供重要的科技支撑。

关键词:黄土高原;植被建设;固碳减排;碳中和

The significance and countermeasures of vegetation construction on the Loess Plateau to carbon neutrality

YANG Yang^{1,2}, ZHANG Pingping^{1,2}, WU Fan^{1,2}, ZHOU Yuanyuan^{1,2}, SONG Yi^{1,2}, WANG Yunqiang^{1,2,*}, AN Shaoshan³

1 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2 National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: China announced its national goal to reach the peak of carbon emission by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060, during the General Assembly of the United Nations in September 2020. In this context, enhancing the terrestrial ecosystem carbon sink (referred to as terrestrial C sink) is an important way to slow down the continuous increase in atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration and to achieve C neutrality target. China's Loess Plateau is both the largest and deepest loess deposit in the world, and it is the initiative of “One Belt and One Road” construction and the natural ecological barrier in the west of China. Indigenous vegetation of the plateau has suffered damage because of growing food needs since the early 1990s. Then, numerous soil erosion control and vegetation restoration projects have been put into practice. With the implementation of the Grain-for-Green Project and vegetation construction in 1999, the Loess Plateau has become the most successful ecological restoration zone. For example, soil organic C sequestration has greatly increased in recent years, specially, remote sensing images indicated that the vegetation coverage on the Loess Plateau increased from 32% in 1999 to 71% in 2020. With increasing scientific and political interest in regional aspects of the global C cycle, there is a strong impetus to better understand the C storage of terrestrial ecosystems of the Loess Plateau. Based on the policy

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42107282);中国科学院青年创新促进会项目

收稿日期:2022-09-02; **网络出版日期:**2023-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyq@ieecas.cn

of the “High-quality Development of the Yellow River” and “Dual Carbon Strategic Goals”, the C sequestration effect of the Loess Plateau will face a major turning point and severe challenge. By this way, this article reviewed the significance and countermeasures of vegetation construction on the Loess Plateau to carbon neutrality. Here, we firstly reviewed the background and process of vegetation construction on the Loess Plateau, and then summarized the C sequestration effect in the process of vegetation construction. According to the C fixation and discharge process, we put forward a series of measures and countermeasures to reduce C emissions, including optimizing the management pattern of vegetation construction, strengthening the top-level design of science and technology, enhancing the C sink capacity of vegetation construction, and building up the C trading market for returning farmland to forest/grass, improving the statistical monitoring system and C calculation standard, etc. Looking forward, the possible problems and challenges in the later stage of vegetation construction were prospected, which would provide importantly scientific and technological support for realizing the strategic goal of C neutrality in our country.

Key Words: the Loess Plateau; vegetation construction; carbon sequestration and emission reduction; carbon neutrality

工业革命以来,人类社会在发展的过程中对自然环境造成了难以逆转的伤害,气候变暖是全球十大环境问题之首;化石燃料(如石油,煤炭等)或木材焚烧会产生大量的温室气体,进而产生“温室效应”,地球生态系统和人类社会的发展将受到严重威胁^[1]。化石燃料燃烧产生的二氧化碳(CO₂)在过去200多年来累计达到2.2万亿吨。据IPCC^[1]最新评估,全球大气中CO₂浓度在工业化前(1750年前)低于280×10⁻⁶,从19世纪后半叶(1850—1900年)到2020年的140余年间,大气CO₂浓度由285 μmol/mol增加至414 μmol/mol^[2],大气中CO₂平均浓度达到了近百万年以来的最高水平,全球平均温度增加了1.09℃^[3-4]。为抑制全球气候变暖,过去30年间国际社会在控制温室气体方面做出了巨大努力。1997年,联合国气候变化大会颁布了《京都议定书》,要求发达国家温室气体限量排放;经过十多年的努力,发达国家温室气体2010年排放总量比1990年减少5.2%。2015年的《巴黎气候协定》提出到本世纪末,全球增温幅度较工业化前不超过2℃,力争1.5℃以内。为此,国际社会提出在21世纪中叶实现CO₂净零排放,将全球气温增幅维持在2℃以内,全球需要在2025年、2050年前分别实现碳达峰、碳中和,这关乎人类社会的可持续发展,是世界各国共同面临的挑战^[5]。中国是世界上最大的发展中国家,同时也是“世界工厂”,我国推进碳达峰和碳中和的意义重大,彰显了大国精神^[6-8]。2020年9月,习总书记提出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施”,对世界做出2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”的承诺。随后党的十九届五中全会、中央经济工作会议和政府工作报告等都从各方面展开了战略性部署,“碳达峰”和“碳中和”纳入我国生态文明建设重点工作。

陆地生态系统固碳是当前减缓大气CO₂浓度升高从而促成碳中和的重要途径之一^[2, 9-11]。全球陆地生态系统的固碳能力约为34亿t C/a^[1],我国陆地生态系统是显著的碳汇,在过去几十年一直扮演着重要的碳汇角色,在以往研究中被严重低估^[11]。从1960年代至2000年中国陆地生态系统碳汇无明显变化或微弱下降,但2000年以后碳汇能力逐渐增强,植被建设在此过程中发挥了重要作用^[7-8, 12]。据报道:2001—2018年间,我国植被的GPP不断增加(49.1—53.1 Tg C/a),气候和人类活动对植被生产力增加的贡献相当,分别为48%—56%和44%—52%^[13]。在空间上,植被恢复是中国北方农牧交错带、黄土高原和西南喀斯特地区植被固碳增加的主要途径^[14]。最新研究表明,我国陆地生态系统在2010—2016年间平均每年吸收约11.1亿t碳,达到同时期人为碳排放的45%^[13]。通过全球CO₂反演模型修正后的结果显示:2010—2016年我国平均陆地碳汇的合理反演估计约为9.2亿t CO₂/a,陆地生态系统碳储量的增加速率约为2.8亿t C/a^[11, 15],这也是我国近40年来恢复天然森林植被、加强人工林建设的巨大投入取得的成果。据最新预测,我国陆地生态系统在2021—2060年的碳汇潜力将达到2.97—3.60亿t C/a,其中生态建设增汇速度为0.54—0.68亿t C/a^[16-17]。由此可知,我国的植被建设在生态系统碳汇功能中发挥着重要作用^[18-19],厘清植被建设与生态系统

碳汇功能关系及其对碳平衡的意义是实现“碳中和”战略目标重要的基础支撑。

1 黄土高原植被建设历程

中国作为世界第六大植被大国,近 30 年来植被分布和组成发生了巨大变化^[20]。据报道,2000 年以来,仅中国就占全球人为植被绿化(包括人工绿化和再造林)的 25%,由于人类活动的密集和前所未有的气候变化,中国超过 40%的植被区经历了植被类型的变化^[13];这些变化可能会改变我国陆地生态系统碳汇能力,并影响其吸收大气 CO₂以减缓全球变暖的能力^[10-11, 21]。中国气象局发布的《2020 年全国生态气象公报》显示,2020 年全国植被生态质量继续提高,达到 2000 年以来最好状态,地表变“绿”、固碳能力显著增强,有利的气候条件和生态工程的实施共同促进了生态系统碳储量的增加^[22-23]。根据进一步的监测,全国植被生态质量指数 2020 年达到 68.4,较常年提高 7.3%,植被覆盖度较常年增加 3 个百分点,植被生态质量指数达到最好状态^[24]。黄土高原是我国植被变绿增幅(植被碳汇增加幅度)最大的区域之一,也是退耕还林还草、治沟造地、固沟保塬、淤地坝建设等重大生态工程实施的典型区域^[25-26]。通过森林管理、退耕还林、植被恢复等措施可以显著增加土壤和植被的碳汇,利用植物光合作用将大气中的 CO₂固定在植被和土壤中,进而降低大气中 CO₂浓度^[27]。随着植被的快速恢复,黄土高原植被群落发生正向演替,凋落物的不断积累、分解增加了土壤有机质积累量^[28-29];反过来又促进植被群落的生长,对生态系统碳汇功能和陆地碳平衡产生重大影响^[30-32](图 1),在生态建设、植被生长等的作用下,黄土高原发挥了并将持续发挥重要的陆地碳汇效应。由此可知,黄土高原植被建设在助力碳中和方面是既简单又行之有效的方法。

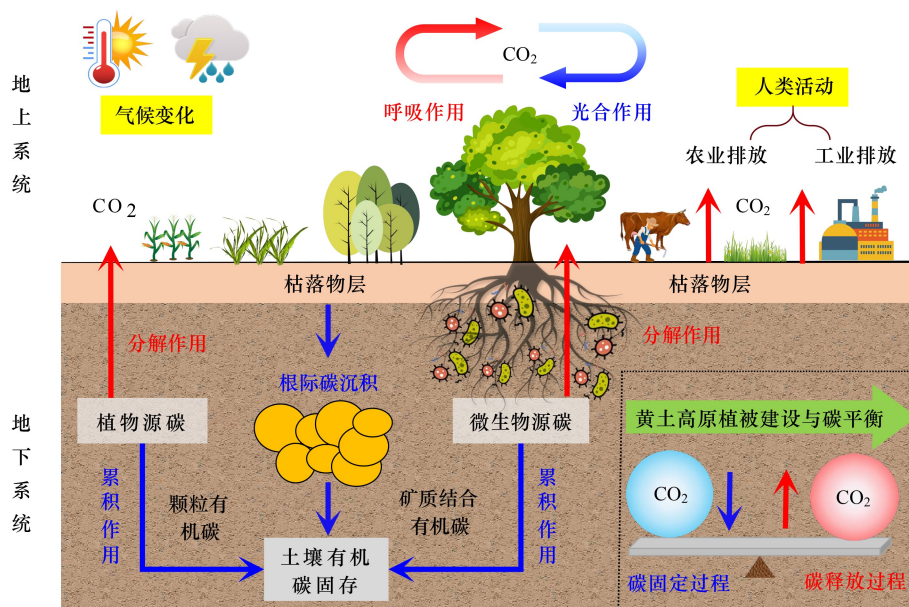


图 1 黄土高原植被建设与碳平衡结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of vegetation construction and carbon balance structure on the Loess Plateau

黄土高原地处黄河中游,是我国温带半湿润、半干旱的过渡区,面积约 64 万 km²,占中国陆地总面积的 6.67%,具有世界上最大的黄土分布区^[33],也是黄河流域实施环境保护和高质量发展战略的核心区^[34-36]。该区域年平均降雨量在 200—700 mm 之间,植被从东南到西北分别为:暖温带落叶阔叶林、森林草原、典型草原、荒漠草原。黄土高原近千年社会—生态系统演变可以划分为 5 个阶段:“耕种快速扩张”(1100—1750 年代)、“耕种持续扩张”(1750—1950 年代)、“农田工程以增加粮食生产”(1950—1970 年代)、“从粮食生产向生态保护转型”(1980—1990 年代)、“植被恢复以保护生态环境”(2000 年代至今)^[37]。随着西部大开发和“一带一路”的倡议,我国对黄土高原区已经投入了大量的人力、物力和财力^[25, 35]。在黄土高原植被建设的

初期(20 世纪 50 年代),由于理论和经验不足,对植被建设目的、林草种植技术、树草种选择等方面缺乏有效管控,导致林草保存率较低,大部分地区的植被恢复工程以失败告终^[38],如 20 世纪 50 到 70 年代的“山顶戴帽子”;80 年代初期,人工种植红豆草,飞播沙打旺,三年内长势喜人,五年后逐渐衰亡^[39];90 年代中期以来发展的大面积果园,也已普遍出现土壤干层化^[40]。由于植被种类选择不当、种植密度过大,以及生产力过高等一系列问题,导致土壤出现干层,肥力衰退,退化的土壤又反过来限制植物的生长、发育,甚至引起部分个体死亡,最终导致生态系统的退化^[32, 38]。为重塑生态系统,黄土高原于 1999 年开始实施大规模的退耕还林/草政策,坚持生态优先,重视绿色发展,贯彻“绿水青山就是金山银山”的发展理念^[34—35]。自此,黄土高原植被恢复取得显著成效,植被覆盖明显增加^[35],监测结果显示,2017 年黄土高原林草覆盖率为 65.2%,相比 1999 年增加 33.6%,水土保持林草及封禁面积累计超过 24 万 km²^[41]。最新的研究显示:2000—2020 年黄土高原植被覆盖度由 0.39 提高到 0.61,整体呈上升趋势,2017 年后实现快速提升;国家政策和措施实施等人为因素对植被覆盖度改善发挥重要作用^[42]。郭永强等^[43]采用 Landsat Surface Reflectance data 分析了黄土高原植被覆盖度的时空变化规律,从 2000 至 2015 年,气候变化对黄土高原植被覆盖度变化的相对贡献率为 24%,人类活动为 76%,人类活动是引起黄土高原植被覆盖度变化的主要原因。据陕西省林业厅报道,2000 年至 2020 年,陕西省全省植被指数变化百分率平均 17.9%,为全国平均值 2 倍,陕西省绿色版图向北推进 400km(图 2)。自然因素和人类活动对陕西省绿色版图北扩的相对贡献率分别为 20%、80%,其中人类活动贡献份额中,政策因素和科技因素的相对贡献率分别为 30%、50%。

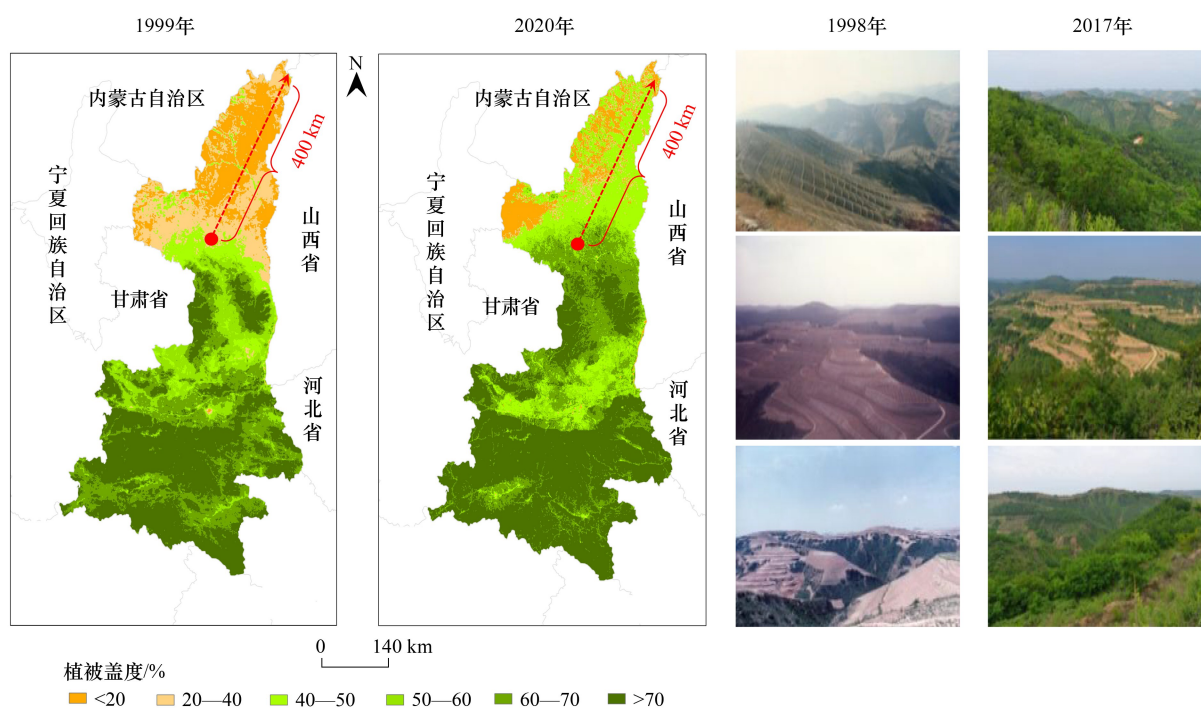


图 2 陕西省 1999—2020 年植被覆盖度指数变化,延安燕沟植被覆盖 20 年对比(田均良、史新合摄影)

Fig.2 Changes of vegetation coverage index in Shaanxi Province from 1999 to 2020, and comparison of vegetation coverage in Yangou watershed of Yan'an (photoed by Tian junliang and Shi xinhe)

2 黄土高原植被建设措施与科学问题

建国以来,国家主要采取了三大举措进行黄土高原的综合治理,一是大规模综合考察,摸清家底;二是部署研究机构,推进多学科观测研究;三是陆续推动十多项重大生态修复和水土保持治理工程,为黄土高原生态治理创造了历史最好的时期^[44]。从黄土高原国土整治的“28 字”方略,到新时代生态环境综合治理“26 字”

建议,以及水土保持生态农业理论、植被修复理论等系列成果都为黄土高原生态屏障区建设提供了理论指引^[45](图 3)。20 世纪 60 年代以来国家陆续实施的十多项重大生态修复工程(坡面整治、沟谷联合、淤地坝建设、小流域综合治理、退耕还林草等)为黄土高原生态屏障区建设提供了时代机遇^[46];基于野外台站网络开展的长期定位研究作为黄土高原生态屏障区建设提供了科学依据。总体成效及标志性的成就可总结为四个方面:(1)黄土高原植被覆盖度显著提高,实现了由黄到绿,并逐步向绿色、高质量发展的转变^[35]。(2)黄土高原水土保持功能显著提升,侵蚀强度明显减弱,水土流失面积及入黄泥沙显著下降^[47]。(3)农村经济收入显著增加,“三生”空间趋于优化,特别是通过加强生态经济林建设和沟道土地整治工程,已形成农业和产业一体化的立体结构^[48]。(4)土地利用效率和生态系统服务功能显著提升,区域粮食供需基本平衡,区域经济社会稳定发展^[41]。



图 3 黄土高原植被建设措施与科学问题

Fig.3 Vegetation construction measures and scientific problems on the Loess Plateau

整体上,黄土高原生态系统在向更健康的方向发展,各项生态系统服务显著提升,但同时也面临着区域产水量下降,以及植被建设稳定性、区域粮食生产等方面问题^[35-36]。盲目不合理的植被建设会增加蒸散发,导致土壤含水量、流域产流明显降低,局部地区生态系统服务功能下降^[49-50]。随着植被建设的持续推进和经济建设的快速发展,黄土高原生态环境面临新的挑战:(1)黄河输沙量降低至历史低值水平;(2)黄土高原植被覆盖度急剧增加;(3)黄土高原水资源可持续利用趋近植被恢复的极限;(4)人类活动的贡献率达到前所未有的高度^[44]。对此,我们提出以下 4 个科学问题应对新时期黄土高原生态环境面临的挑战:(1)黄河流域水沙调控与碳排放;(2)黄土高原植被建设的碳汇效应;(3)黄土高原植被建设的水资源承受能力;(4)人类活动和气候变化对碳汇平衡的响应^[51]。因此,黄土高原碳汇功能与水资源安全、植被水资源承载力等多功能权衡是关键,合理的植被恢复,适应水资源承载力,不过渡消耗水资源,提高植被建设的碳汇功能。结合当代我国的基本国情,在未来的 40 年,我国实现碳达峰、碳中和目标将面临新的机遇与挑战,在气候变化和植被恢复的背景下,需要充分全面提升黄土高原植被建设的碳汇功能。为此,本文系统综述了黄土高原植被建设的背景与历程,针对黄土高原生态系统碳的固定和排放过程,提出了一系列的增碳减排措施,为黄土高原生态效益、碳汇功能提升提供重要参考,同时对我国陆地生态系统碳捕获、实现碳中和具有重大意义。

3 黄土高原植被建设的碳汇效应

本世纪以来,黄土高原植被变绿,其中 2020 年黄土高原植被覆盖度达到 71%(图 4),是我国植被建设最显著的区域之一;在黄土丘陵沟壑区等退耕还林/草生态工程实施区域,生态系统净生产力显著增加^[52]。采用 CASA 模型估算 1990—2015 年黄土高原植被净初级生产力的年际变化,结果表明:黄土高原 1990—2015 年植被 NPP 与植被固碳总体呈增加趋势,年均 NPP 增速 $2.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年均固碳增速 1.13 Tg C/a ^[53];杨丹和王晓峰的研究表明:2000—2015 年期间,黄土高原植被 NPP 总体呈增长趋势,植被 NPP 平均增速为 $3.62 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[54];植被 NPP 空间上呈东南高、西北低的分布特征。总体来看,近 30 年植被恢复所带来的 NPP 增加量达到 51.1 Tg C ,表明植被建设提高了黄土高原生态系统的固碳能力^[14, 34, 52]。最新的资料清查数据表明:黄土高原生态系统碳储量约为 2.29 Pg ,在全国仅占比 2.3%;其中,森林生态系统碳储量为 0.98 Pg ,草地为 1.09 Pg ,农田(仅指土壤)为 0.21 Pg ;土壤有机碳储量为 1.52 Pg ,地上和地下生物量碳储量分别 0.44 和 0.32 Pg ^[55](图 4)。

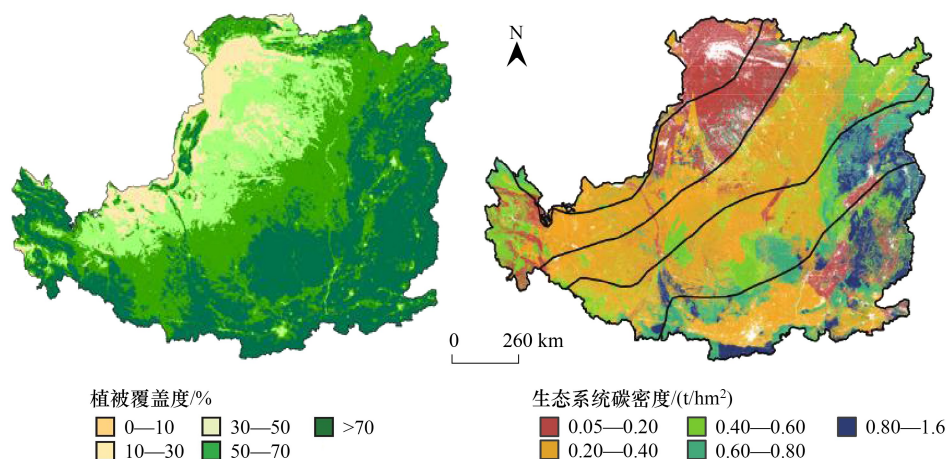


图 4 黄土高原植被覆盖度与生态系统碳储量分布图(2020 年)(右图改自李妙宇等, 2021)^[55]

Fig.4 Distribution map of vegetation coverage and ecosystem carbon storage in the Loess Plateau (2020)

在区域尺度上,黄土高原生态系统 2008 年净固碳能力为 0.108 Pg ,而 2000 年仅为 0.011 Pg ,生态系统固碳量从 2000 年至 2008 年增加了 96.1 Tg ,占比 2006 年全国碳排放量的 6.4%,黄土高原由碳源变为碳汇,植被固碳量增加速率为每年 9.4 g C/m^2 ,增加的最高值位于年均降水量为 500 mm 左右的区域;而土壤固碳效应会有一定滞后性,随着退耕还林草时间的延长将发挥显著作用^[52]。此外,黄土高原土壤有机碳储量由东南向西北递减,有机碳储量 $<20 \text{ Tg}$ 区集中于黄土高原西北大部分地区,占总面积的 19.08%,黄土高原西部、南部及东部的边缘区域有机碳储量在 $40—180 \text{ Tg}$ ^[56—57]。有研究表明:随着植被恢复,土壤固碳速率显著下降^[58];植被恢复早期,土壤固碳速率较高的原因可能是恢复早期矿物质土壤的碳还未达到饱和的状态,地上、地下生物质的不断输入,以及植被恢复后多年生草本的增加,降低了土壤侵蚀,从而增加了土壤有机碳含量^[28—29]。相比人工植被建设,短期内自然恢复更有利于土壤碳固持,且环境因子可作为评估自然恢复模式下土壤碳库变化的重要指标^[32]。研究显示:1981—2020 年中国成熟林植被碳总量从 8.56 Pg C 增加到 9.70 Pg C ,植被固碳速率在 $-0.054—0.076 \text{ Pg C/a}$ 波动,平均值为 0.022 Pg C/a ^[59—60];成熟林土壤碳总量从 30.20 Pg C 增加到 30.72 Pg C ,土壤固碳速率在 $-0.035—0.072 \text{ Pg C/a}$ 波动,平均值为 0.010 Pg C/a ^[61]。此外,一旦天然林被转变为人工林,这种保护机制将受到破坏,导致土壤有机碳库损失^[62—63]。因此,保护天然林是土壤有机碳固存的主要途径之一。

4 黄土高原植被建设的碳中和对策

4.1 优化耕作制度,增强土壤碳库减排增汇效益

土壤碳库是地球陆地表面最大的有机碳库,全球大约有 1500—2000 Pg 的碳以有机碳的形式储存于土壤中,因此土壤碳库是削减碳排放、实现碳中和的重要途径^[64];由于土壤有机碳输入后,通过矿化途径带来温室气体的排放^[62]。黄土高原耕作模式多样化,调控黄土高原土壤有机碳输入与输出之间的平衡,使温室气体净零排放或负排放,是实现该生态系统碳中和的关键。存在于土壤中的大量根系和复杂微生物通过呼吸作用向大气中排放 CO₂,采用保护性耕作措施能达到良好的固碳减排效果^[65]。通过优化和改进耕作方式,如采用少耕免耕技术、秸秆还田、配合使用化肥和有机肥、施加生物炭、补充微量元素等措施,能够有效减少温室气体排放。同时,兼顾经济效益和生态环境效益,强化人为管理措施对生态系统碳源/汇的影响研究,增强黄土高原生态系统的固碳能力。

4.2 合理管理植被建设模式,提升生态系统碳汇功能

某一特定生态系统的固碳潜力相当于一个有着有限容量的容器,当生态系统处于成熟和稳定状态时,总初级生产力趋向于饱和,此时“容器”也即将装满碳^[66]。也即,无论现阶段植被固碳能力如何,从长远来看,植被碳汇是有限的,固碳潜力也是有限的。因此,在助力国家“碳中和”战略目标实现的过程中植被建设能够发挥的优势是,在短期内提供成本较低的碳吸收途径,用于抵消部分人为活动排放的碳,缓解工业减排压力,延缓气候变暖速度,为工业减排赢得关键窗口期。为提升黄土高原植被碳汇功能,应遵循“最优植被建设管理、最优植被规划布局、最优物种配置”的建设原则,采取宜林则林、宜草则草、适地适树(草)的措施,实现植被碳汇功能的最大化;科学的进行植被管理,优化植被结构、类型、密度,解决植被恢复与区域水资源承载力矛盾,可以将黄土高原植被碳汇能力长期维持在一定水平,延长碳汇服务时间,充分发挥时间窗口作用。

4.3 加强科技顶层设计,构建碳交易市场

面向碳中和目标,从国家层面对黄土高原特定的植被建设进行顶层设计,因地制宜制定区域固碳增汇目标。(1)构建黄土高原生态碳汇技术体系,捋清植被建设后碳汇输入和输出量,精准评估植被建设后总碳储量的变化和生态碳汇功能效应。(2)确保碳汇评估的技术方法符合碳汇计量要求,衔接国家最新碳汇计量方面的政策法规,做好技术储备,同时积极推动植被建设新技术,构建科学的碳汇核算方法体系和碳交易市场。(3)建立更为广泛的研究机构和大型野外实验平台,集中科研力量,加大资金投入,加快技术创新,挖掘颠覆性的植被建设技术,寻找黄土高原植被建设的整体解决方案。

4.4 全面推进经济发展绿色转型

(1)坚持低碳发展规划引领。将碳达峰、碳中和战略目标全方位纳入国家发展的中长期规划中,加强国土空间规划、省市县级发展规划、专项规划和区域规划等各类规划的衔接,建立强大支撑体系,确保碳达峰、碳中和政策、目标、方向、重大工程之间相辅相成,协调一致。(2)建设绿色低碳国土空间格局。加强国土空间用途管控,统一国土空间规划体系,统筹部署生态、农业、城镇等功能空间,严格保护具有重要固碳功能(森林、草地、灌丛、土壤等)的生态系统。贯彻山水林田湖草沙等生命共同体的理念,共筑生态廊道,打造西部生态屏障。(3)全面推进重点区域低碳发展。以绿色低碳发展为导向,构建绿色低碳产业体系,在植被建设过程中,充分发挥区域产业协同和联动机制,建立典型黄土区高质量发展示范区,在经济社会全面绿色转型上发挥指引作用。

4.5 健全法规规章制度和碳统计监测体系

(1)出台退耕还林/草的“双碳”规章制度,全面贯彻执行“碳达峰”、“碳中和”等方面的各项法律法规,对违反自然环境保护、土地资源利用等法律法规的行为,严格依法处理。(2)在国家绿色标准体系的基础上,建立健全碳达峰、碳中和的标准计量体系,实施国家统一规范的碳核算体系。(3)建立碳汇监测核算体系,加强碳排放核算能力建设,开展植被、土壤、大气等碳汇本底调查,监测评估生态保护修复措施实施后的碳汇成效。

(4)将碳达峰、碳中和有关指标纳入国家经济发展综合评价体系,建立健全监督检查和考核评估机制,提高碳汇考核权重,加强指标约束。

5 建议与展望

黄土高原是我国“一带一路”建设的倡议地、西部大开发的主战场、国家能源重化工基地聚集地、入黄泥沙的主要策源地;随着植被建设的持续推进,在“碳中和”时期,黄土高原生态系统碳汇功能和植被建设面临严重挑战。

(1)构建以自我修复为基础的植被建设模式,实现生态系统固碳功能最大化

过去黄土高原的植被建设强调生态效益优先,并没有兼顾经济效益,当前种种迹象表明黄土高原植被建设逐步进入自然演替阶段,植被建设的固碳效应也处于相对稳定的状态,植被建设方式从过去对植树造林种草的重视,转而强调植被的自我修复。在进行植被建设的同时,尽量减少人为干扰,促进植被向更复杂更稳定的方向发展。遵循自然规律,建设与当地气候、土壤相适宜,能够进行自我修复的生态系统是植被建设的最终目标,实现群落稳定和生态功能最大化,最大程度发挥生态系统的固碳效应。

(2)科学预判和管理黄土高原植被建设模式,合理预测生态系统碳汇功能。

植树造林一直被认为是黄土高原增碳潜力最大的生态措施,然而植树造林的增汇效应随着林龄增加而规律性降低^[57];目前,黄土高原人工林整体林龄较低,以幼、中龄林为主,处于早期演替阶段,具有较大的碳汇潜力。然而,随着时间推移,幼、中龄林逐渐向成熟林、老龄林发展,生态系统日渐趋于平衡,随之碳汇功能将逐步减弱。随着林龄持续老化,黄土高原人工林碳汇能力在 2060 年以后将面临大幅下降的风险,届时会产生额外的减排压力。因此,在植树造林时不仅要考虑如何实现 2060 年的“碳中和”,还要对碳中和之后生态系统可能出现的问题作出科学预判,并采取措施进行干预。要想维持人工林长期较高的碳汇能力,需要采取合理的森林管理措施,结合生态系统本底状况以及未来气候变化情景进行综合区划,优化林龄空间布局,适当更新树龄结构,避免森林过于老化,延长人工林碳汇服务时间,合理预测黄土高原造林后碳汇功能及潜力。

(3)开发黄土高原植被建设碳汇提升新技术,绘制植被建设过程中碳流通的路径图。

系统评估植被建设后生态系统碳汇潜力,加强对生态系统和碳循环组分的观测,精确计量碳循环参数,探明碳汇调控机制。在碳循环研究中不断引进新技术、新手段,如碳同位素通量监测、微生物组学、近地面遥感等,从微观尺度深入揭示碳汇形成机制;开发黄土高原植被建设碳汇提升新技术,绘制植被建设过程中碳流通



图5 黄土高原植被建设与碳汇平衡(碳中和)实现途径框架图

Fig.5 Framework of vegetation construction and carbon sink balance (carbon neutrality) on the Loess Plateau

的路径图(图5);同时,预估在未来气候变化和人类活动背景下,植被建设的固碳能力和增汇潜力,分别量化环境变化、植被生长和人为措施对碳汇功能的贡献,完善对植被建设的碳汇潜力评估。

(4)发展“空—天—地”一体化的碳实时监测体系,助力黄土高原植被建设的碳汇功能。

扩大生态系统调查和植被观测的时空范围,提高精度,结合卫星对地观测与数字地球技术,增强观测数据(植被、大气、气候等)的时空代表性,可视化展示生态系统碳收支时空分布,并发展更为先进的碳循环模型—数据融合方法和系统。以黄土高原多站点数据为基础,融合陆地碳通量塔,结合遥感碳观测和碳卫星、多光谱卫星实时监测数据,引入深度学习和人工智能的大数据分析方法,发展“空—天—地”一体化的碳实时监测体系(图5),科学地评估植被建设的碳收支与排放动态特征,并绘制植被建设与碳汇平衡实现途径,最终服务于“碳中和”的长期愿景目标。

参考文献(References):

- [1] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yeleki O, Yu R and Zhou B(eds.)]. Cambridge University Press
- [2] Liu Z, Deng Z, Davis S J, Giron C, Ciais P. Monitoring global carbon emissions in 2021. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4): 217-219.
- [3] Frölicher T L, Fischer E M, Gruber N. Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 2018, 560(7718): 360-364.
- [4] Wei Y M, Han R, Wang C, Yu B Y, Liang Q M, Yuan X C, Chang J J, Zhao Q Y, Liao H, Tang B J, Yan J Y, Cheng L J, Yang Z L. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-13.
- [5] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Zaehle S. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12: 3269-3340.
- [6] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应—中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [7] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 郭正堂. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(7): 1419-1426.
- [8] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 423-434.
- [9] Liu Z, Deng Z, He G, Wang H L, Zhang X, Lin J, Qi Y, Liang X. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 3(2): 141-155.
- [10] Lu N, Tian H Q, Fu B J, Yu H Q, Piao S L, Chen S Y, Li Y, Li X Y, Wang M Y, Li Z D, Zhang L, Ciais P, Smith P. Biophysical and economic constraints on China's natural climate solutions. *Nature Climate Change*, 2022, 12(9): 847-853.
- [11] Wang Y L, Wang X H, Wang K, Chevallier F, Zhu D, Lian J H, He Y, Tian H Q, Li J S, Zhu J X, Jeong S, Canadell J G. The size of the land carbon sink in China. *Nature*, 2022, 603(7901): E7-E9.
- [12] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D辑*, 2007(6): 804-812.
- [13] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [14] Chen Y Z, Feng X M, Tian H Q, Wu X T, Gao Z, Feng Y, Piao S L, Lv N, Pan N Q, Fu B J. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in China after 2010: A turning point resulting from climate and human interaction. *Global Change Biology*, 2021, 27(22): 5848-5864.
- [15] Piao S L, He Y, Wang X H, Chen F H. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [16] 方精云. 碳中和的生态学透视. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [17] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世革, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
- [18] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to

2010. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [19] Zheng T L, Zhu J L, Wang S P, Fang J Y. When will China achieve its carbon emission peak? National Science Review, 2016, 3(1): 8-12.
- [20] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.
- [21] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin F S 3rd. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [22] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [23] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, Lan H, Zhang X L, Li J, Liu X F, Chang S J, Xie Y C. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 1-10.
- [24] 许云飞. 实施大规模国土绿化行动 全国森林覆盖率 2020 年将达到 23.04%. 国土绿化, 2018(1): 7-8.
- [25] Fu B, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [26] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau. Earth-Science Reviews, 2019, 199: 102962.
- [27] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, Bessler H, Engels C, Griffiths R I, Mellado-Vázquez P G, Malik A A, Roy J, Scheu S, Steinbeiss S, Thomson B C, Trumbore S E, Gleixner G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. Nature Communications, 2015, 6(1): 1-8.
- [28] An S S, Mentler A, Mayer H, Blum W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. Catena, 2010, 81(3): 226-233.
- [29] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). Geoderma, 2013, 209/210: 75-85.
- [30] Yang Y, Dou Y X, An S S. Testing association between soil bacterial diversity and soil carbon storage on the Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2018, 626: 48-58.
- [31] Yang Y, Dou Y X, Cheng H, An S S. Plant functional diversity drives carbon storage following vegetation restoration in Loess Plateau, China. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 668-678.
- [32] Yang Y, Dou Y X, Wang B R, Wang Y Q, Liang C, An S S, Soromotin A, Kuzyakov Y. Increasing contribution of microbial residues to soil organic carbon in grassland restoration chronosequence. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 170: 108688.
- [33] Zhu Y J, Jia X X, Qiao J B, Shao M A. What is the mass of loess in the Loess Plateau of China? Science Bulletin, 2019, 64(8): 534-539.
- [34] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [35] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [36] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [37] Wu X T, Wei Y P, Fu B J, Wang S, Zhao Y, Moran E F. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau. Science Advances, 2020, 6(41): eabc0276.
- [38] 张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120-124.
- [39] 上官周平, 王飞, 咎林森, 赵国平, 吴普侠, 苏卓侠. 生态农业在黄土高原生态保护和农业高质量协同发展中的作用及其发展途径. 水土保持通报, 2020, 40(4): 335-339.
- [40] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [41] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [42] 王逸男, 孔祥兵, 赵春敬, 姚贵琦, 郭凯. 2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析. 水土保持学报, 2022, 36(3): 130-137.
- [43] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 李成, 罗晓琦, 冯浩. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4804-4811.
- [44] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. 生态学报, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [45] 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理. 地球环境学报, 2019, 10(3): 316-322.
- [46] Deng L, Shangguan Z P. High quality developmental approach for soil and water conservation and ecological protection on the Loess Plateau.

Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2021, 8(4): 501.

- [47] 穆兴民, 李朋飞, 刘斌涛, 赵广举, 高鹏, 孙文义. 1901—2016 年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制. 人民黄河, 2022, 44(9): 36-45.
- [48] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-9.
- [49] 杨阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(11): 4052-4063.
- [50] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [51] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [52] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1-5.
- [53] 张佑铭, 郎梦凡, 刘梦云, 谢宝妮, 常庆瑞. 土地利用转变与海拔高度协同作用黄土高原植被固碳变化特征. 生态学报, 2022, 42(10): 3897-3908.
- [54] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响. 干旱区研究, 2022, 39(2): 584-593.
- [55] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(17): 6786-6799.
- [56] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 彭文英. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析. 水土保持学报, 2003, 17(3): 13-15.
- [57] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化. 地理学报, 2018, 73(11): 2150-2167.
- [58] 史利江, 高杉, 姚晓军, 张晓龙, 李文刚, 高峰. 晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1787-1796.
- [59] He N P, Wen D, Zhu J X, Tang X L, Xu L, Zhang L, Hu H F, Huang M, Yu G R. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050. Global Change Biology, 2017, 23(4): 1575-1584.
- [60] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836-843.
- [61] 黄玫, 侯晶, 唐旭利, 郝曼. 中国成熟林植被和土壤固碳速率对气候变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(4): 416-424.
- [62] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer R J, von Unger M, Emmer I M, Griscom B W. The role of soil carbon in natural climate solutions. Nature Sustainability, 2020, 3(5): 391-398.
- [63] Hong S B, Yin G D, Piao S L, Dybzinski R, Cong N, Li X Y, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A P. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 694-700.
- [64] Goldstein A, Turner W R, Spawn S A, Anderson-Teixeira K J, Cook-Patton S, Fargione J, Gibbs H K, Griscom B, Hewson J H, Howard J F, Ledezma J C, Page S S, Koh L P, Rockström J, Sanderman J, Hole D G. Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. Nature Climate Change, 2020, 10(4): 287-295.
- [65] Hussain S, Hussain S, Guo R, Sarwar M, Ren X L, Krstic D, Aslam Z, Zulifqar U, Rauf A, Hano C, El-Esawi M A. Carbon sequestration to avoid soil degradation: a review on the role of conservation tillage. Plants: Basel, Switzerland, 2021, 10(10): 2001.
- [66] Canadell J G, Pataki D E, Gifford R, Houghton R A, Luo Y Q, Raupach M R, Smith P, Steffen W. Saturation of the Terrestrial Carbon Sink. Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. Terrestrial Ecosystems in a Changing World. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 59-78.