

论水土保持措施的碳汇效应若干问题

张永娥^{1,2}, 赵阳^{1,2}, 殷晓琳^{1,2}, 余新晓³, 张晓明^{1,2}, 王昭艳^{1,2}, 刘冰^{1,2}, 成晨^{1,2}

1 中国水利水电科学研究院, 北京 100038

2 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100038

3 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 全球 CO₂ 浓度的持续升高是引起全球气候变暖的重要因素, 在这种大背景下, 局部地区的水资源短缺也将成为新常态。水土保持改变地表覆被和结构、土地利用方式和陆地生态系统的管理措施等, 可以增加植被和土壤碳库的碳储存能力。本文综述了林草措施恢复对植被碳库的影响, 并探讨了植被恢复、梯田、淤地坝和免耕等措施与土壤碳库的关系, 认为水土保持措施具有明显的碳汇效应, 可以缓解气候变化的不利影响。研究可为区域高质量发展和实现“碳中和”提供有效支撑。

关键字: 气候变化, 水土保持, 碳中和, 土壤碳库, 植被碳库

Issues of carbon sink effect of soil and water conservation measures

Zhang Yonge^{1,2}, Zhao Yang^{1,2}, Yin Xiaolin^{1,2}, Yu Xinxiao³, Zhang Xiaoming^{1,2}, Wang Zhaoyan^{1,2}, Liu Bing^{1,2}, Cheng Chen^{1,2}

1 China Water Resources & Hydropower Science Research Institute, Beijing 100083, China

2 Research Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources

3 College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The continuous elevation of global CO₂ concentration have an important effect on global warming. Concurrently, water shortage may be intensified in many areas of the world. Soil and water conservation measures can increase the carbon storage capacity of vegetation and soil carbon pool by changing the land cover and structure, land use pattern and management measures of terrestrial ecosystem. In this paper, the effects of vegetation restoration on vegetation carbon pool were reviewed, and the relationship between vegetation restoration, terraces, silting dam and no-tillage and soil carbon pool were discussed. It was concluded that soil and water conservation measures had obvious carbon sink effect and may alleviate the adverse effects of climate change. The research can provide effective support for regional high-quality development and the realization of "carbon neutrality".

Key words: Climate change, soil and water conservation, carbon neutralization, soil carbon pool, vegetation carbon pool

大气 CO₂ 浓度升高是引起全球变暖的重要因素。根据 2019 年世界气象组织 (WMO) 发布的最新温室气体公告, 在 2018 年, 全球 CO₂ 浓度达到工业革命前的 147%, 平均值约为 $407.8 \pm 0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 继 2017 年的 $405.5 \pm 0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 又增加了 $2.3 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2019)。在未来, 这种全球 CO₂ 浓度不断升高的趋势还将持续下去, 若以过去十年 (2006~2017) 中平均增速 ($2.26 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 计算, 预测到 2147 年, 全球 CO₂ 浓度超过 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。在以全球变暖为主要特征的全球气候变化背景下, 水资源在时间与空间上的分配正发生变化, 进而导致全球洪涝或者干旱等自然灾害发生的频率和强度增加, 全球范围内的水资源短缺也将成为新的常态 (Dai, 2011; Lobell *et al.*, 2014)。

自 20 世纪 80 年代以来,全世界用水量每年约增长 1%,根据《2019 年世界水发展报告》,这一趋势将会以类似增速持续到 2050 年,用水量与当前相比将增加 20%~30%。然而,一个残酷的事实是:当前全世界有 20 多亿人生活在严重缺水的国家中,而每年约有 40 亿人面临至少一个月严重水荒。这些问题深刻影响着人类对水资源的规划、开发及利用,威胁着全世界的持续稳定发展,受到世界各国政府和公众的普遍关注。与全球平均水平相比,我国的缺水问题更加突出。中国人口占世界人口的 20%,而水资源仅占全球的 7%,中国的 600 个城市中有 2/3 面临严重水资源短缺(UNESCO, 2019)。因此,在全球气候变化的背景下,如何适应并应对气候变化对水资源安全的不利影响,对实现生态安全和我国社会经济的可持续发展,以及争取生态环境外交主动权等具有重要意义。

水土保持的出发点不是减缓全球气候变化,但是它的发展和过程却深刻地改变着地表覆被和结构、土地利用方式和陆地生态系统的管理措施等,改变碳素或温室气体在不同库间的循环,进而影响全球气候背景下的“碳源”和“碳汇”变化。在新时代下,揭示水土保持对全球气候变化之间的影响,是水土保持学科的重要前沿领域之一。目前,国际社会对水土保持给予了高度的关注。例如,全球气候变化研究正在执行的四大国际科学计划:世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)和国际生物多样性计划(DIVERSITAS),都把水土保持对气候环境的效应作为重要研究内容。

植被和土壤碳库研究

植被是陆地生态系统的主要组成部分,植被通过光合作用,可以吸收大气中的 CO_2 ,并将其转变为有机物储存起来,用于植被的各项生理活动(沈允钢, 2000)。植被的这种光合作用是碳捕集的重要方式,可以实现碳中和,进而缓解气候变暖(杜林方, 1999; 刘宁等, 2012)。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)研究团队认为,植树造林可能是应对气候变化最有效的解决方案。为应对全球变暖,到 2050 年以前,全球需要再种植一万亿棵树,相当于 10 亿公顷的森林,以便将全球气温控制在比工业化前高 1.5°C 的范围之内。然而,《Nature》杂志刊出一篇题为“*How much can forests fight climate change*”的文章指出,森林可能并不是解决气候变化的有效方案,部分森林会吸收大量的光线引起温度升高,这种变暖效应可能会部分或完全抵消其带来的冷却效应(Popkin et al., 2019)。森林的这种表现在高纬度地区、山区或干燥地区尤为明显。目前,虽然在“部分森林是否能缓解气候变化”仍存在争议,但森林的碳汇功能是值得肯定的。因地制宜地营建植被恢复工程,仍然是应对“温室效应”的有效举措。

相对于植被生物量碳库,土壤中累积形成的是一种更理想的稳定碳库(Dawen et al., 2003)。土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,土壤有机碳的微小变化,都会对全球气候变化产生重要影响。在全球碳循环过程中,土壤侵蚀和泥沙搬运使土壤有机 C、N 的组分和含量发生较大变化,侵蚀与沉积过程引起土壤有机 C、N 在陆地景观的重新分配,是土壤有机 C、N 从陆地向河流以及海洋输送的重要驱动,会影响到全球生源要素,尤其是 C、N、S、P 的循环,最终会对全球气候变化产生重要影响。土壤侵蚀是加速还是减缓全球气候变暖,不同的学者立足于不同尺度,研究结果差异显著,甚至得出了相反的结论。以 Renwick 等为代表的沉积学家认为,自然界的土壤侵蚀过程有利于碳素吸存,并认为在全球尺度上,这种碳汇功能达到了 6 亿~15 亿 t/a;而以 Lal 等(1995, 2004)为代表的土壤学家却坚持相反的观点,他们

认为,土壤侵蚀是一种碳源过程,并预计全球尺度上这种碳源作用将达到 10 亿 t/a。实际上,因侵蚀而产生的碳素既不会完全沉积下来,也不会沉积之前完全被矿化,真正的情况是介于两种极端情况之间,在碳素运输和重新分布过程中,有一部分比例的土壤有机碳在沉积之前就已经被氧化,只是在具体情况中,这种比例的大小不同而已。水土保持措施(植物措施、工程措施和耕作措施)及其合理有效配置,能使退化的土壤重新吸存有机碳,同时减少 CO₂ 向大气中的释放,也成为缓解大气中 CO₂ 浓度上升的有效手段之一。另外,由于土壤侵蚀流失的是地表表层土壤,而这部分土壤是土壤有机碳的主要富集区,这导致加速土壤侵蚀会使得表层土壤有机碳优先流失。因此,防治土壤侵蚀的水土保持措施,也会使土壤有机碳储量增加。

水土保持措施对植被碳库的影响

在我国,人工生态恢复使植被碳汇功能提高明显。基于 CASA 模型,王丹丹(2019)估算了华北土石山区植被净初级生产力,认为 2000-2018 年间的平均值为 395.80 gC/m²·yr。据估计,在 1981~2000 年间,中国陆地植被年均总碳汇为 96.1~106.1 TgC/a,相当于同期中国工业 CO₂ 排放量的 14.6%~16.1%,土壤碳汇为 41~64 TgC/a,中国陆地生态系统的总碳汇(植被和土壤)相当于吸收了同期中国工业 CO₂ 排放量的 20.8%~26.8%。据预测,在自然生长状况下,2000~2050 年中国现有森林与新造森林的生物量碳汇合计为 7230 TgC,平均年碳汇量为 140 TgC/a,这其中还未统计土壤碳库的贡献。

进入 21 世纪以后,中国先后实施“三北”和长江中下游地区等重点防护林建设工程、退耕还林还草工程、京津风沙源治理工程、天然林保护工程等防护林工程,全国森林覆盖率也由建国时期的 8.6%提升至目前的 22.96%,植被“碳汇”功能明显增强。据监测,全国 25 个工程省区和新疆生产建设兵团退耕还林每年约固碳 0.49 亿吨(中国退耕还林还草二十年,2020)。因此,中国植被系统具有较大的碳汇潜力。

需要注意的是,植被虽然具有明显的碳汇功能,但是其维持自身生长,又需要消耗一定的水分(于贵瑞等,2004)。植被蒸腾作用和土壤蒸发是植被生长过程中水分散失的主要途径。随着中国植被恢复和保护等水土保持事业的推进,中国陆地生态系统的固碳潜力会得到进一步的增强。因此,在全球气候暖干化日益显著的背景下,揭示森林植被水、碳过程及其耦合机制,平衡植被固碳和耗水的矛盾,从而实现“依水定碳”,降低耗水和提高碳汇两手抓,变得尤为重要。

水土保持措施对土壤碳库的影响

水土保持植被恢复对土壤有机碳蓄积的影响比对植被生物量碳库的影响更受到关注。退化土壤和生态系统的恢复具有很大的碳吸存潜力,是增加碳吸存的一种重要策略(Lal et al., 2004)。有研究指出,生态恢复能使侵蚀退化土壤吸收 60%~75%从土壤损失的有机碳,并认为全球范围内退化土壤的碳吸存潜力可达 3.0 亿~8.0 亿 t/a(Lal et al., 1995)。在植被恢复过程中,不仅可以通过植物凋落物分解和根系分泌物直接向土壤输入有机碳,还可以通过促进土壤团聚体的形成来固存有机碳。早在 2009 年,于澳大利亚召开的第 19 届国际恢复生态学大会就重点关注了地球逐渐降低的生物多样性和退化生态系统的问题,强调通过生态恢复来降低全球变化的不利影响,甚至改变全球变化。

淤地坝是我国黄土高原地区广泛分布的以防洪拦沙、淤地造田为主要目的的水土保持工程措施,其在增加陆地有机碳储存方面有一定作用。研究指出,1957~2000 年碾庄沟流域淤地坝共储存有机碳 17.3 万

t, 流域有机碳储存强度提高了 $0.13 \sim 5.03 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 到 2002 年底, 黄土高原地区淤地坝工程共增加有机碳储量 1.2 亿 t, 占 1994 ~ 1998 年全国人工造林工程增加有机碳储量的 17.1%, 是美国年沉积泥沙有机碳储量 (4000 万 t/a) 的 3 倍 (李勇等, 2003)。

“坡改梯”是水土保持工程措施的一种重要类型。坡耕地改造为梯田后, 土壤碳库中总有机碳与活性有机碳含量都随改造年限的增加而显著增加, 碳库管理指数总体呈现逐渐增加的趋势; “坡改梯”以后, 不仅能够减少土壤有机碳随坡面径流的损失, 梯田上快速恢复的植被也有利于向土壤返还有机碳 (戴全厚等, 2008)。

在水土保持耕作措施中, 免耕 (或深翻等保护性耕作措施) 也是一种重要的有利于土壤有机碳积累的形式。通过免耕措施, 地表保存残茬覆盖, 可以降低雨滴溅蚀和土壤流失, 从而减少有机碳随坡面径流损失的机会。免耕等保护性耕作措施还可以减少对土壤结构的破坏, 抑制土壤呼吸, 从而有利于土壤有机碳积累。地表秸秆覆盖增加了有机碳向土壤返还的机会, 有利于土壤有机碳的产生和积累。中科院东北地理所监测, 连续实施保护性耕作 5 年后, 表层 20cm 土壤有机质含量增加 10%, 10 年后增加 21%, 15 年后增加 52%。Wood 和 Edwards (1992) 研究发现, 与翻耕耕作相比, 保护性耕作 10 年后土壤有机碳储量增加 $2.8 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。逢蕾和黄高宝 (2006)、张洁等 (2007) 在黄土高原旱地及李琳等 (2006) 对北方土石山区的研究中都表明, 免耕可以增加土壤有机碳含量。此外, 人工水库中大量的沉积泥沙可能也是一个重要的碳吸收汇。

结语

多年来, 通过一系列的水土保持实践, 我国植被和土壤碳汇功能明显提高, 生态环境质量得到了显著改善。例如在我国的黄河中上游, 尽管受到气温和降水量波动等的影响, 但由于在过去几十年中实施的各项水土保持措施开始持续发挥效益, 黄河年输沙量急剧下降, 入黄泥沙持续减少, 在非汛期, 黄河 80% 以上的河段相对清澈, 黄河的水不“黄”而“绿”, 黄河变“清”了。黄河因水土流失导致的有机碳损失得到有效控制, 植被和土壤碳汇功能持续发挥作用, 逐步开始实现“让黄河成为造福人民的幸福河”。未来应持续推进我国水土保持事业, 以缓解和应对气候变化对水资源和水安全的不利影响, 并为实现碳中和提供有效支撑。

参考文献

1. WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018[R]. World Meteorological Organization, 2019, No. 15.
2. Dai, A. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2: 45-65.
3. Dawen Y, Kanae S, Oki T, et al. 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes[J]. *Hydrological Processes*, 17: 2913-2928.
4. Lal R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics//Lal R, Kimble J M, Leevine E, et al. *Soils and Global Change*. Boca Raton: Lewis Publishers.
5. Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 304 (5677) : 1623-1627.
6. Lobell D B, Roberts M J, Schlenker W, Braun N, Little B B, Rejesus R M, Hammer G L. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest[J]. *Science*, 2014, 344: 516-519.
7. Popkin, G. . (2019). How much can forests fight climate change?. *Nature*, 565(7739), 280-282.
8. The United Nations World Water Development Report 2019: leaving no one behind [R]. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2019.
9. Wood C W, Edwards J H. 1992. Agroecosystem management effects on soil carbon and nitrogen[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1992, 39:123-138.
10. 戴全厚, 刘国彬, 薛蕙, 等. 2008. 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*. 28 (4) : 17-21.
11. 杜林方. 光合作用研究的一些进展世界科技研究与发展[J]. 1999, 21(1): 58-62.
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[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2007(06):804-812.
13. 国家林业和草原局. 中国退耕还林还草二十年(1919-2019) [R], 2020.06.
14. 李琳, 李素娟, 张海林, 等. 2006. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. *水土保持学报*, 20 (3) : 106-109.
15. 李勇, 白玲玉. 2003. 黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J]. *水土保持学报*, 17 (2) : 1-4.
16. 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣. 陆地水-碳耦合模拟研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3187-3196.
17. 逢蕾, 黄高宝. 不同耕作措施对旱地土壤有机碳转化的影响[J]. *水土保持学报*, 2006(03):110-113.
18. 沈允钢. 地球上设重要的化学反应(光合作用) [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2000.
19. 王丹丹. 华北土石山区植被水碳耦合机制研究[D]. 北京林业大学, 2019.
20. 于贵瑞, 王秋凤, 于振良. 陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究[J]. *地球科学进展*, 2004, 19:831-839.
21. 张洁, 姚宇卿, 金轲, 等. 2007. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 21 (4) : 126-129.