

DOI: 10.12401/j.nwg.2023066

黄土高原碳汇系统研究展望

洪增林^{1,2,3}, 成星^{1,4}, 张瑜^{1,5}, 陈清敏^{1,4}, 曾忠诚^{1,5}

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 西北工业大学智能地质调查联合研究中心, 陕西 西安 710072;
3. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 陕西省地质调查院实验中心,
陕西 西安 710065; 5. 陕西省地质调查院矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 全球温度升高 1.2 °C, 应对气候变化已经到了刻不容缓的地步。2019 年 9 月, 中国政府承诺中国在 2030 年碳达峰, 在 2060 年碳中和, 这是一份巨大担当, 也是一个巨大的挑战。碳中和的达成需要节能减排, 还需要负排放技术和增加生态、地质碳汇。能源结构的调整和 CCUS 等负排放技术的发展需要几十年的时间, 亟需要调查和研究生态和地质碳汇的现状并且增加碳汇潜力。全球范围的碳汇清查主要依靠“自上而下”和“自下而上”的估算方法, 而国家级别的区域碳汇清查目前还是一个难点。黄土高原是最早起步进行退耕还林还草生态工程的地区, 也是生态脆弱区。目前, 黄土高原区域的碳汇调查和研究尚属于起步阶段。基于国家“双碳”战略需要和黄土高原生态文明建设, 笔者从地球系统科学角度, 回溯黄土高原的碳汇调查研究成果, 总结黄土高原区域碳汇评估的方法体系, 包含有机碳汇系统和无机碳汇系统。其中, 有机碳汇系统包含有机质碳储量子系统和生态碳汇子系统的研究; 无机碳汇系统主要包含碳酸盐碳汇系统和硅酸盐碳汇系统。在此基础上, 从地球系统科学角度提出黄土高原碳汇调查研究建议。

关键词: 黄土高原; 碳中和; 生态碳汇; 农田土壤碳汇; 无机碳汇; 地球系统科学

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0039-12

Key Issues of Earth System Science in the Study of Carbon Sinks in the Loess Plateau

HONG Zenglin^{1,2,3}, CHENG Xing^{1,4}, ZHANG Yu^{1,5}, CHEN Qingmin^{1,4}, ZENG Zhongcheng^{1,5}

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Research Center of Intelligent Geological Survey, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Experimental Center of Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 5. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: With the global temperature rising by 1.2 °C, it is urgent to deal with climate change. In September 2019, the Chinese government promised that China will reach its carbon peak in 2030 and become carbon neutral in 2060, which is a huge responsibility and a huge challenge. The achievement of carbon neutrality requires energy conservation and emission reduction, as well as negative emission technologies and an increase in ecological and geological carbon sinks. The adjustment of the energy structure and the development of negative emission technologies such as CCUS will take decades. There is an urgent need to investigate and study the current status of ecological and geological carbon sinks and increase the potential of carbon sinks. The global car-

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2023-03-16; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 陕西省重点研发计划项目“地质作用对陕北生态脆弱区生态环境影响机理研究”(2021SF2-03)资助。

作者简介: 洪增林(1963-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事资源与环境、卫星遥感技术应用研究。E-mail: lhqhzi@163.com。

bon sink inventory mainly relies on the "top-down" and "bottom-up" estimation methods, while the national-level regional carbon sink inventory is still a difficult problem. The Loess Plateau is the first area where the ecological project of returning farmland to forests and grasslands started, and it is also an ecologically fragile area. The current investigation and research on carbon sinks in the Loess Plateau is still in its infancy. Based on the needs of the national carbon neutral strategy and the construction of ecological civilization on the Loess Plateau, this paper begins to review the research results of carbon sinks on the Loess Plateau from the perspective of earth system science. Firstly, the method system of carbon sink assessment in the Loess Plateau is summarized, and then it is further summarized that the carbon sink system of the Loess Plateau mainly includes organic carbon sink system and inorganic carbon sink system. Among them, the organic carbon sink system includes the research on the organic carbon storage sub-system and the ecological carbon sink system. The inorganic carbon sink system mainly includes carbonate carbon sink system and silicate carbon sink system. Finally, from the perspective of earth system science, the suggestions are given for the investigation and research of carbon sinks in the Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; carbon neutrality; ecological carbon sink; farmland soil carbon sink; inorganic carbon sink; earth system science

迄今为止,人类排放的温室气体(CO₂、甲烷等)造成的全球温度升高1.2℃,如果持续恶化会对全人类造成巨大的灾难(IPCC, 2021; 蔡兆男, 2021; 丁仲礼, 2021),极端气候事件发生的风险将进一步加剧。越来越多的研究表明,应对气候变化已经到了刻不容缓的地步。根据目前的调查研究,中国的生态系统碳汇占据每年碳排放的比例从20世纪80~90年代的30%下降到2010年以来的7%~15%,主要是由于碳排放增长速率大于碳汇增加速率所致(方精云, 2007; 朴世龙等, 2022a)。从长远来看,自然界的生态碳汇长期是趋零的(朴世龙等, 2022a)。随着全球气温的逐年升高,生态碳汇所能抵消的碳排放比例越来越低,利用好最近几十年生态碳汇提供的时间窗口对“碳中和”具有重要意义(朴世龙等, 2022a)。

黄土高原的生态系统是一个巨大的有机碳汇潜力库。黄土高原沉积有巨厚的黄土古土壤,包含有大量的碳酸盐钙结核,以及黄土高原大量的岩溶水,这些形成了一个巨大的碳酸盐岩无机碳汇。目前,黄土高原的区域生态碳汇评价还处于起步阶段,无机碳汇更是受到的关注度极少。为了深入研究黄土高原的碳汇问题,笔者从地球系统科学角度,总结了黄土高原有机质、生态碳汇和无机碳汇的几项关键问题,为黄土高原生态环境脆弱区实现“双碳”目标提供重要参考资料。

1 黄土高原的区域背景和碳汇系统

黄土高原的地理范围位于太行山以西,乌鞘岭以东,秦岭以北,长城以南,处于中国中北部黄河中游地区,其坐标为E 101°~114°,N 33°~41°,平均海拔为1 000~2 000 m,包括山西和宁夏全境、陕西省北部和中部、甘肃省东部和中部,青海东北部以及内蒙古的河套平原和鄂尔多斯高原等地区(李妙宇, 2021)。黄土高原面积约为65万km²,占中国陆地总面积的7%。黄土高原属于干旱-半干旱大陆性季风气候,主要受到东亚季风的影响,夏季低纬水汽到达黄土高原造成气候温热湿润,冬季西伯利亚冷空气形成黄土高原寒冷干旱的气候(An, 2000; 腾志宏等, 2000; Zhang et al., 2022)。黄土高原多年平均气温为7.3℃,多年平均降水量为447 mm。时间尺度上,降雨年际及年内变化较大,年内多集中在7~9月;空间尺度上也具有较大的空间分异,自东南向西北逐渐减少(杨艳芬等, 2019)。

黄土高原地质构造上位于秦岭构造体系和阴山构造体系之间,向西嵌入康藏多字型构造体系,向东横跨新华夏构造体系,中部为巨形的祁吕贺山字型构造体系。黄土高原地下水的赋存分布规律,主要受到地质背景、水文条件、气候条件等多种因素的控制(腾志宏等, 2000)。黄土高原区域广泛被巨厚的黄土覆盖,黄土的平均厚度为92.2 m,是全世界最大的黄

土堆积区 (Zhu et al., 2018)。根据黄土被切割后发育的形态不同可以分为黄土的塬、梁、峁及沟壑区等典型的地貌形态。黄土高原的西北部主要为荒漠, 南部主要为关中盆地, 东南主要为岩石裸露区, 中西部主要为黄土丘陵沟壑区。自西北向东南分布有风沙土、褐土、黄绵土与黑垆土, 中部地区的黄绵土分布最为广泛 (李妙宇, 2021)。第四纪以来, 黄土高原沉积的黄土古土壤记录了亚洲季风的变化, 除了显著的 10 万年冰期冰期旋回周期 (Ding et al., 1995; Guo et al., 2000), 还记录了明显的 2 万年岁差周期 (Sun et al., 2015; Beck et al., 2018)。这说明黄土高原不仅受到了高纬冰盖的影响, 也受到了低纬太阳辐射的影响。冰期冰期旋回带来的季风雨带的变化会推动着黄土高原的植被带至少有 300 km 的移动 (Yang et al., 2015), 目前的大气 CO₂ 的升高水平已经超过了冰期冰期的尺度, 全球变暖背景下, 季风雨带的移动对黄土高原生态系统的影响也是一个需要评估的重要因素。

黄土高原自然地理条件的差异导致了植被带的分异, 自东南向西北明显呈现了森林向草原和荒漠过度的景观格局 (Feng et al., 2013)。受自然背景和人类活动的共同影响, 导致黄土高原成为生态脆弱区, 土壤侵蚀与水土流失严重 (高海东等, 2015), 生态环境不断恶化。为改善生态环境质量, 国家于 1999 年开始在黄土高原地区实施退耕还林(草)生态恢复工程。经过了 20 多年的发展, 退耕还林还草等生态工程取得了显著的效果, 80% 的区域植被覆盖度显著上升, 固碳能力显著提高。水土保持等生态系统功能显著增强, 黄土高原的整体固碳量增加了约 45% (李婷等, 2020)。黄土高原的碳汇系统总体来说分为生态碳汇子系统和无机碳汇子系统两部分 (图 1), 2 个子系统包含的要素有所区别, 其调查和研究方法也有区别, 以下主要从生态碳汇和无机碳汇 2 个方面对黄土高原碳汇系统进行归纳总结。

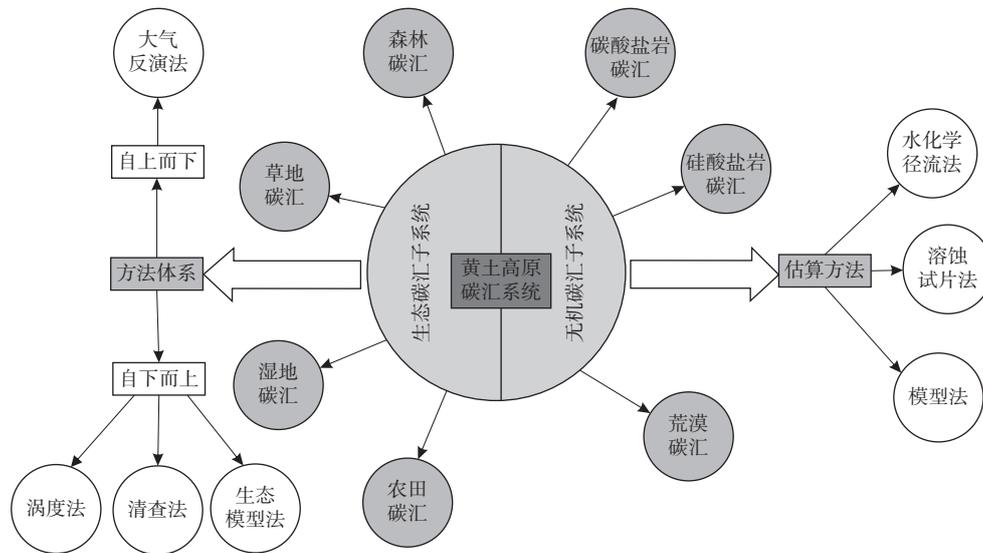


图 1 黄土高原碳汇系统

Fig. 1 Carbon sink system in the Loess Plateau

2 黄土高原的陆地生态碳汇系统

随着全球变暖, 陆地生态系统成为了一个重要的大气 CO₂ 的汇入区。2010~2019 年, 全球陆地生态系统吸收了人类化石燃料和土地利用同期排放的 31% 的 CO₂ (Friedlingstein et al., 2020)。目前, 全球尺度的陆地生态碳汇估算通常采用碳平衡方程残余项解析法: 人类活动排放的碳减去大气增加的碳和海洋固定

的碳。这一方法考虑到大气混匀很快, 仅适用于全球尺度, 而区域尺度并不适用, 存在较大误差 (朴世龙等, 2022b)。北半球的陆地生态系统被近几十年的研究认为是一个重要的碳汇, 但该碳汇的具体大小还有极大的争议 (Fan et al., 1998; Pan et al., 2011)。除了 Wang 等 (2020) 报道的中国陆地碳汇为 (1.11±0.38) Pg/Ca, 其他方法估计的中国陆地生态系统的碳汇为 0.21~0.33 Pg/Ca。李妙宇 (2021) 估算的黄土高原未来固碳潜力约为 2.155 Pg。

2.1 陆地生态碳汇的估算方法体系

从国家层面的陆地生态系统碳汇的估算方法总体可以分为“自上而下”和“自下而上”2种(朴世龙等, 2022a)。“自上而下”的方法也就是大气反演法, 主要是基于区域的大气 CO₂ 浓度反算出陆地生态系统碳汇。大气反演法的局限在于大气观测站点的分辨率, 目前中国的大气观测站点数量非常有限。“自下而上”的方法包括涡度相关法、清查法和生态系统过程模型模拟法。涡度法容易受到人类活动的影响; 清查法周期过长, 需要样点密度高才具有较高的可信度; 而模型估算的方法则存在参数具有较大不确定性, 导致估算结果误差较大的局限性。

从黄土高原区域角度而言, 目前有3种主要的区域生态系统固碳潜力评估方法: 时间序列法、时空替代法与限制因子法。时间序列法估算生态固碳潜力的原理是使用目前生态系统的数据库建立生态系统生物量的时间序列, 换算成碳储量可计算出未来的总碳储量, 便可以知道固碳潜力。例如, 森林系统常常遵循 Logistic 模型, 一个生态系统会有一个森林的承载上限, 是生态研究中最为广泛使用的固碳潜力评估方法。时空替代法估算生态固碳潜力是假设在相似的环境条件下, 相同的演化阶段的生态系统会有类似的碳循环过程, 不同阶段的生态系统的碳储量和现阶段的碳储量差值就是固碳潜力。限制因子法是在考虑碳储量的各环境影响因子在时空上的限制, 进而对固碳潜力进行估算的方法, 理论上当所有限制因子的值达到最小时, 碳储量可达到最大固碳量。

2.2 有机质碳储库子系统

最近的多项研究结果表明, 生态系统在黄土高原的植被覆盖度快速恢复后, 拥有巨大的固碳潜力(Deng et al., 2014; Li et al., 2020)。生态系统碳储量是反映其固碳能力, 生态质量的重要指标(Avitabile et al., 2016), 准确评估生态系统碳储量, 和其固碳潜力对于碳中和情境下的区域长期可持续发展具有重要意义。目前, 在黄土高原上, 针对整个区域的不同单一生态系统的碳储量的评估、清查和碳储量潜力计算已不少, 但是统一黄土高原多个森林、草地、湿地、土壤等生态系统的碳储量的多生态系统的总评估还很少见。这可能是由于不同的生态系统碳储量的控制因素和分布规律具有很大差异, 另外, 深入的点上研究可能很难兼顾全面的清查和评估工作。此外, 无

论从全球尺度还是区域尺度, 碳储量的评估方法和清查标准并不是完全统一的, 因此需要集中攻关研究一套系统性的碳储量的评估方法。

李妙宇(2021)基于黄土高原地区实测的碳密度数据, 使用 GIS 手段和克里金空间插值法, 评估了黄土高原地区的生态碳储量现状, 并利用路径分析和相关分析不同生态系统碳储量的控制因素和贡献, 发现黄土高原地区总的生态系统碳储量为 2.265 Pg, 地上生物量为 0.422 Pg, 地下生物量为 0.319 Pg, 土壤有机碳库储量为 1.524 Pg, 森林生态系统碳储量为 0.978 Pg, 草地生态系统碳储量为 1.086 Pg, 农田生态系统碳储量为 0.205 Pg。可以发现, 目前黄土高原土壤有机碳库是最大的碳库, 地面的生物量相对土壤有机碳更少一些。另外, 森林生态系统虽然相比较草地生态系统目前占比更小, 但是最近 20 年来得到了快速的提高。农田生态系统的碳储量占比虽然小, 但是其周期短, 具有年际变化特点, 易于管理, 更容易增汇, 每年度是一个重要的碳储量和碳汇研究单元。

李巧玲等(2019)通过对宁夏荒漠化的草原不同阶段的土壤有机碳和无机碳的研究, 发现随着沙漠化的加剧, 0~10 cm 与 0~30 cm 土层有机碳和无机碳都出现了非常明显的下降。程淑兰等(2004)对比陕北榆林市 1982 年和 2003 年土壤普查有机质调查结果, 发现随着治沙生态工程的开展, 耕作层(0~20 cm)、1m 深度和全剖面的土壤有机质分别增加了 10.12 Gg、19.06 Gg 和 20.1 Gg, 表明荒漠化的持续治理能够显著提高土壤的固碳能力, 增加生态碳汇。

2.3 黄土高原的生态碳汇系统

生态碳汇的清查就是要对生态系统的固碳潜力进行评价。固碳潜力的准确评估, 生态系统的管理和优化起到重要的参考作用。如何准确并且科学的评估目前全国乃至全球的生态固碳潜力是实现碳达峰和碳中和目标的工作之一。

He 等(2017)在野外获得实测数据后, 利用模型模拟了天然林和人工林的生物量随时间变化的 Logistic 方程, 估算了中国森林在 3 种碳排放情境下 2020~2050 年的固碳潜力。刘迎春等(2019)利用中国各省份的森林清查数据, 根据不同树种, 不同林龄的最终森林积蓄量, 计算碳储量, 最终估算了基于 2001 年的全国森林固碳潜力为 6.52 Pg C。邓蕾(2014)利用时空替代法评估了黄土高原退耕还林后单位面积的固碳潜力。宋超(2015)利用顶级自然林的碳密度减去现状的自然林和人工林的碳密度估算出未来

的固碳潜力。

张晴等(2009)认为中国陆地生态系统总体表现为碳汇,西北荒漠为碳源,其中内蒙古中部有向碳源转化的趋势。Yu等(2013)提出东北的温带草原系统、青藏高原东部高山草甸生态系统是较强的碳汇,而青藏高原中部的草甸和内蒙古温带草原表现出了弱碳源格局。Kato等(2006)和董刚(2011)的研究也有类似的结论。这些研究表明中国草地生态系统总体表现为碳汇,少量区域草地生态系统有从碳汇转变为碳源的趋势。李妙宇(2021)的研究表明,目前可预测的环境因子限制条件下,黄土高原地区生态系统未来最大的碳储量为4.42 Pg,总的固碳潜力为2.155 Pg;森林生态系统固碳潜力为0.957 Pg、草地生态系统固碳潜力为1.103 Pg;土壤碳库总体对固碳潜力的贡献度要高于植被,其固碳潜力为1.417 Pg。

2.4 农田土壤碳汇管理体系

根据近几十年的研究,虽然证明农田生态系统的有机质储量和固碳潜力相对森林和草地生态系统较小。但是,农田土壤有机质具有年际的周期性变化,可以通过有效的管理措施快速地调整碳汇的大小,相较其他生态系统更易于实现。根据联合国粮农组织(FAO)的调查报告,农业生态系统已成为全球第二大温室气体来源,但同时也具有潜在的巨大增汇空间。可以通过农田土壤有机碳的管理措施,有效的增加农田系统的碳汇(乐小芳等,2020)。目前,生态和农业学界关于农田土壤碳汇的主要研究集中在土壤有机碳储量的评估、农田土壤碳汇模型研究、农田土壤碳汇潜力研究、农田土壤碳汇影响因素研究、农田碳汇的生态补偿机制等方面。

梁二等(2010)分析了中国各省最近20年来农田土壤有机碳储量的变化趋势,评估了农田土壤碳汇潜力,对认识和评价中国农田土壤碳汇能力提供了方法和依据。潘根兴等(2005)系统总结了我国农田土壤碳汇研究和全球变化研究以及国家粮食安全之间的联系,提出了农田土壤碳汇研究的重要性。韩冰等(2008)总结了我国目前农田土壤碳汇的研究现状,系统估算了通过农田管理措施可以每年提高182.1Tg固碳量,农田土壤碳汇潜力相当于中国能源排放的23.9%。为深入理解农田土壤有机碳的大尺度、长时间范围内的动态变化,很多研究对土壤碳汇模型的建立和应用进行了报道。目前,最广泛应用的有3重模型:Century模型、DNDC模型和Rothc模型。其中,

Century模型是当前用来评价农田生态系统土壤碳汇演化最为有效的工具之一(乐小芳等,2020)。

3 黄土高原无机碳汇系统

黄土中的主要矿物成分是石英、长石和云母为主的硅酸盐碎屑矿、黏土矿物、碳酸盐矿物及氯化物和硫酸盐等易溶性盐类(张龙军等,2011)。黄土中存在以碳酸盐岩风化和硅酸盐风化为主要的无机碳汇过程。据统计,黄土无机碳库约为有机碳库的2~5倍,无机碳储量达 8.5×10^2 PgC(秦小光等,2001),每年截储大气碳的规模约150万t碳(Li et al., 2007)。中国黄土与世界其他地区黄土相比,表现为贫 SiO_2 、 Fe_2O_3 ,富 CaO 、 MgO ,黄土长时间的水-矿物作用导致硅酸盐矿物溶解,生成次生碳酸盐岩过程中消耗大气中的 CO_2 的速率较高(邵明玉等,2019)。黄土中碳酸盐岩溶蚀过程中,不但可以固存大气 CO_2 ,还可以固存土壤有机碳分解产生的 CO_2 ,对调节大气 CO_2 以及全球碳循环具有重要的影响(杨黎芳等,2006)。以往研究中通过研究黄土中成壤碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 的记录,重建第四纪时期大气 CO_2 浓度,为研究古环境气候变化提供重要依据(Cerling et al., 1993; 陈骏等,1996; 张崧,2008; 苗甜等,2021),但针对黄土中碳酸盐岩矿物的岩溶碳汇效应研究还比较弱,黄土中硅酸盐风化和碳酸盐溶蚀过程对碳汇的贡献如何,对于进一步研究全球碳循环,寻找全球“遗漏汇”具有重要意义。

3.1 无机碳汇的理论体系

3.1.1 碳酸盐岩风化痰汇原理

黄土中无机碳库的主要存在形式是碳酸盐矿物,可以分为原生和次生碳酸盐矿物。前者指来源于母质并不存在化学变化的碳酸盐,后者指 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 结合后沉积形成的碳酸盐,其中次生碳酸盐矿物占总碳酸盐矿物90%左右(文启忠,1989)。黄土具有较高的人渗性能,稳定入渗速率达到0.5~1.35 mm/min,出渗速率达到15~28.5 mm/min,大部分降水入渗土壤(蒋定生等,1986),土壤水和土壤 CO_2 结合,导致下伏黄土层的次生碳酸盐矿物快速溶蚀,产生溶解性的无机碳(DIC)进入水体,从而影响人类在短时间尺度上对大气 CO_2 的调节作用(熊平生等,2008; Zhang et al., 2015)。水体中的无机碳被微生物或者水生生物利用固定,形成永久碳汇(Liu et al., 2018)。碳酸盐岩化学反应过程见公式(1),风化痰汇过程如图2所示。

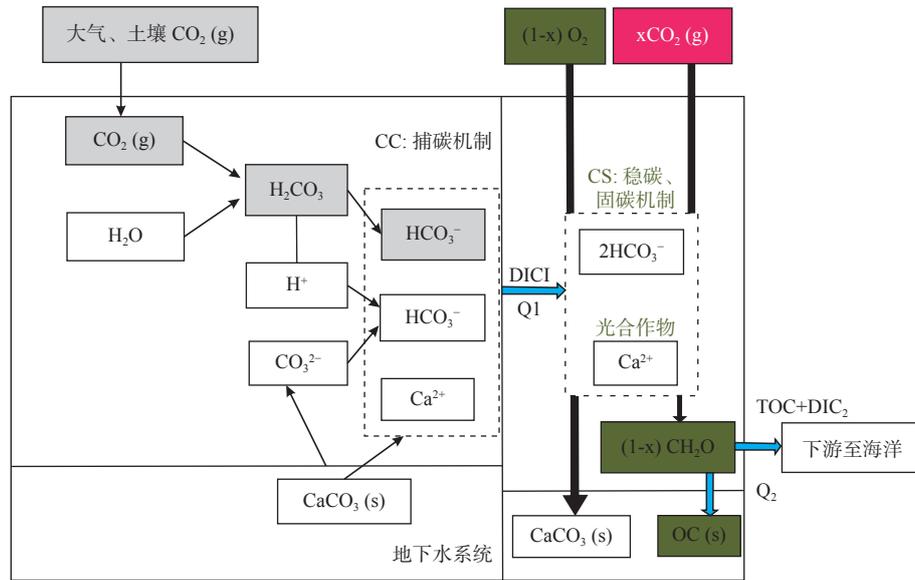
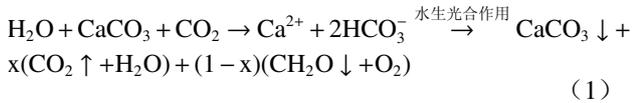


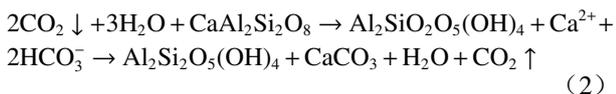
图2 基于流域(地下水系统+地表水系统) $H_2O-CaCO_3-CO_2$ -水生光合生物相互作用的碳酸盐风化碳汇模式图(Liu et al., 2018)

Fig. 2 Model map of carbonate weathering carbon sink based on $H_2O-CaCO_3-CO_2$ -aquatic photosynthetic organisms interaction in watershed (groundwater system + surface water system)

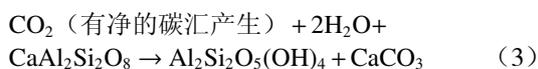


3.1.2 硅酸盐岩风化碳汇原理

在全球碳循环中,硅酸盐化学风化被认为是大气 CO_2 的一个重要的汇入方式。从全球尺度上看,硅酸盐风化每年消耗的大气 CO_2 量为0.138~0.169 Gt,相比现在大气碳库中碳的含量(约为800 Gt)似乎是微不足道的。硅酸盐风化消耗 CO_2 并将其作为碳酸盐矿物埋藏在海洋,储存时间超过百万年。因此,从地质时间尺度上看,硅酸盐风化是调节全球碳循环的一个重要机制(吴卫华等,2012)。土壤碳酸盐形成过程中,每1 mol 硅酸钙风化净消耗1 mol 大气 CO_2 ,这个过程中吸收大气 CO_2 ,并固定在含碳酸钙的土壤中,具体反应公式如下:



总反应公式为:



3.1.3 无机碳汇估算的方法

岩石化学风化及其碳汇通量的计算方法主要有正演模型(Forward model)、反演模型法(Inversion model)、水化学径流法、溶蚀试片法以及Galy模型法

(表1)(Wu et al., 2013; 覃小群等, 2015; Yang et al., 2022)。已有学者采用正演模型和反演模型对中国青藏高原地区岩石风化过程中进行了研究,并计算出硅酸盐风化速率及其消耗的 CO_2 速率(Wu et al., 2013; Zhang et al., 2013; Yang et al., 2022)。近年来,水化学径流法和Galy模型法已应用于黄土高原碳酸盐岩化学风化及碳汇通量研究。水化学径流法是一种估算流域整体的碳酸盐岩风化量的方法,通过测定流域出口处水体中 HCO_3^- 浓度和流量来估算流域 CO_2 的输出总量,进而估算流域所消耗的 CO_2 的单位年通量(Liu et al., 2018)。Galy模型法可以区分不同岩石(矿物)对流域溶解物质的贡献,Xiao等(2016)利用Galy模型对旱季黄土高原6个典型小流域内河水溶解物质来源进行分析并估算了 CO_2 消耗量。通过对比研究发现,由于土壤中含碳酸钙矿物,无机碳含量较高会导致试片法结果偏小,埋放于土下的试片溶蚀速率低于地表基岩面的溶蚀速率,在干旱地区计算岩溶碳汇效应宜采用水化学径流法(黄奇波等,2015a, 2015b)。已有研究表明,北方黄土区的流域边界相对稳定(贾旖旎,2010)。因此,水化学径流法在黄土区流域计算岩石(矿物)风化碳汇强度和碳汇通量提供了理论基础。目前,多数学者均采用水化学径流法来估算黄土区流域尺度的碳汇通量(邵明玉等,2019)。

除此以外,碳的稳定同位素示踪技术适合于从年

表1 无机碳汇估算方法汇总表

Tab. 1 Summary table of methods for estimating carbon sinks

估算方法	计算公式	适用场景	参考文献
正演模型	排除大气、外源酸和微量碳酸盐矿物影响之后, 计算花岗岩和玄武岩的风化阳离子浓度总和($K+2Ca+Na+2Mg$), 并结合每个流域的径流深 q (mm), 分别计算出花岗岩和玄武岩风化的阳离子通量	适用于流域尺度的硅酸盐化学风化研究	(Yang et al., 2022)
反演模型	$[\Phi CO_2]_{sil} = (2Ca^{2+}_{sil} + 2Mg^{2+}_{sil} + Na^{+}_{sil} + K^{+}_{sil}) \times \text{径流量} / \text{流域面积}$ $[\Phi CO_2]_{carb} = (Ca^{2+}_{carb} + Mg^{2+}_{carb}) \times \text{径流量} / \text{流域面积}$ $[\Phi CO_2]_{sil}$ 和 $[\Phi CO_2]_{carb}$ 分别为硅酸盐和碳酸盐化学风化消耗的 CO_2 速率	适用于流域尺度的硅酸盐化学风化研究	(Wu et al., 2013)
水化学径流法	$F = 1/2 \times [HCO_3^-] \times Q \times M_{rCO_2} / M_{rHCO_3} / S$ 式中: F 为岩溶碳汇强度($t/(km^2 \cdot a)$), $[HCO_3^-]$ 为水体中所含 HCO_3^- 的浓度(g/l), $1/2$ 指径流中一半碳来自大气, Q 为流域径流量(l/s), M_{rCO_2} 和 M_{rHCO_3} 分别为 CO_2 和 HCO_3^- 的相对分子质量, S 为流域面积(km^2)	明确的流域边界、地下水为全排型, 至少有一个完整的水文年的流量和 HCO_3^- 浓度数据。同时要扣除硝酸和硫酸等外源酸对地下水中 HCO_3^- 的贡献	(刘再华, 2000)
Galy模型法	将河流中水化学离子组分归因于不同岩石端元的溶解, 根据河水中元素比值关系, 估算不同岩石风化对河水溶质的贡献。硅酸盐风化组成的地下水, 离子比值为一定值($Mg^{2+}/K^+=0.5$, $Ca^{2+}/Na^+=0.2$) 若仅考虑碳酸(H_2CO_3)对碳酸盐岩($CaCO_3$)的风化溶蚀, 地下水中TDS来源于碳酸盐岩溶蚀生成的量表示如下: $TDS_{碳酸盐岩} = [Ca^{2+}]_{碳酸盐岩} + [Mg^{2+}]_{碳酸盐岩} + 1/2[HCO_3^-]$ 若考虑硫酸(H_2SO_4)和碳酸(H_2CO_3)共同参与了碳酸盐岩($CaCO_3$)的风化溶蚀, 地下水中TDS来源于碳酸盐岩溶蚀生成的量表示如下: $TDS_{碳酸盐岩} = [Ca^{2+}]_{碳酸盐岩} + [Mg^{2+}]_{碳酸盐岩} + 1/4[HCO_3^-]_{碳酸} + [HSO_4^-]_{硫酸}$ 硅酸盐风化速率计算如下: $TDS_{硅酸盐岩} = [Na^+]_{硅酸盐岩} + [K^+]_{硅酸盐岩} + [Ca^{2+}]_{硅酸盐岩} + [Mg^{2+}]_{硅酸盐岩} + [SiO_2]_{硅酸盐岩}$ 来源于硅酸盐岩风化消耗的大气/土壤 CO_2 计算公式如下: $CO_{2硅酸盐岩} = [HCO_3^-]_{硅酸盐岩} = [Na^+]_{硅酸盐岩} + [K^+]_{硅酸盐岩} + 2[Ca^{2+}]_{硅酸盐岩} + 2[Mg^{2+}]_{硅酸盐岩}$	适用于中小流域尺度的岩石风化碳汇, 估算不同岩溶风化对地表河水的贡献	(Galy et al., 1999; 覃小群等, 2015)
溶蚀试片法	$E = (W_1 - W_2) \times 1000 \times T^{-1} \times 365 \times S^{-1}$, 式中, E 为试片溶蚀速率($mg \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1}$), W_1 为埋放前的试片重量(g), W_2 为回收后的试片重量(g), S 为试片溶蚀表面积, T 为试片埋放的时间(d) $F = E \times S \times R \times M_{CO_2} / M_{CaCO_3}$, 式中, F 为岩溶作用吸收的 CO_2 的汇($10^{10}g/a$), E 为岩石试片的溶蚀速率($mg \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1}$), S 为岩溶区面积(km^2), R 为岩石试片的碳酸盐岩纯度, M_{CO_2} 和 M_{CaCO_3} 分别为 CO_2 和 $CaCO_3$ 的相对分子质量	广泛用于岩溶碳汇研究中, 在西南岩溶区应用较为广泛, 在黄土区估算量偏低	(黄奇波等, 2015a, 2015b)

到百年尺度的土壤碳循环过程, 能有效地阐明地下碳动态变化和土壤碳储量的微小迁移与转化(Galdo et al., 2003; 于贵瑞等, 2005)。稳定同位素 $\delta^{13}C$ 可以用来分辨碳酸盐的来源及其累积速率, 精确量化碳酸盐数量(Khademi, 2010; Wang et al., 2015)。

3.2 黄土高原的碳酸盐岩碳汇系统

在干旱、半干旱地区, 土壤碳酸盐岩转化周期比较长, 土壤碳酸盐的形成是一个重要的地质碳汇过程, 使其可以作为一个相对稳定的碳库。按照碳酸盐矿物的成因, 黄土中碳酸盐矿物主要是沙漠、戈壁区以

及古海相碳酸盐地层原生碳酸盐矿物和黄土沉积以后风化成壤过程中形成的, 主要来自原生碎屑 $CaCO_3$ 溶解后沉淀及含钙硅酸盐矿物风化后沉积的次生碳酸盐矿物(陈秀玲等, 2008)。碳酸盐矿物在黄土中十分富集, 含量最高可达20%, 其中约90%为次生碳酸盐矿物, 涂夏明等(2012)初步估算陕西境内黄土高原表土层固定无机碳储量为0.856 Pg, 无机碳储量远大于有机碳储量, 且无机碳含量随着深度增加而增大(黄奇波, 2019)。对土壤中温室气体组分研究发现黄土中的 CO_2 浓度比大气中的 CO_2 浓度高几十倍(刘嘉

麒等, 1996; 刘强等, 2000)。

目前, 国内外学者针对黄土区不同土地利用类型的土壤呼吸特征做了大量的研究。结果显示, 不同土地利用类型的黄土中无机碳储量显著不同, 草地碳储量显著高于农田(李旭东, 2011)。退耕还草后草地 CO₂ 通量的升高和降低与植被因素具有相关性, 这一现象说明不同土地利用方式的土壤呼吸特征具有和植物生长量相关的显著差异(齐丽彬等, 2008)。黄土高原地区现代土壤 CO₂ 通量与土壤水热条件呈显著相关(Yi et al., 2007)。黄土中的碳酸盐矿物含量高、颗粒较细、溶蚀作用强, 但目前针对黄土碳酸盐矿物的碳循环过程、碳汇量级的研究并不深入, 建议开展长期监测, 进一步提高数据的精度。

3.3 黄土高原的硅酸盐岩碳汇系统

与碳酸盐风化碳汇相比, 硅酸盐风化碳汇被认为是净地质碳汇, 在百万年时间尺度上对全球气候产生负反馈调节作用(Maher et al., 2014)。黄河流域硅酸盐风化 CO₂ 消耗率上游 > 中游 > 下游, 消耗量中游 > 上游 > 下游, 上、中游硅酸盐风化 CO₂ 消耗量分别为下游的 33 倍和 37 倍(张龙军等, 2011)。Yang 等(2022)对比研究黄河上游和中下游硅酸盐风化速率和 CO₂ 消耗速率, 发现从上游到中下游逐渐降低。通过水化学径流法计算不同端元离子来源贡献, 发现硅酸盐矿物和碳酸盐矿物化学风化贡献的溶解物质分别占总溶解物质的 62.23% 和 19.31%, 黄土区硅酸盐矿物溶解贡献率占主导因素(邵明玉等, 2019)。陕北黄土高原地区表层黄土有机碳和无机碳储量分别为 0.272 Pg 和 0.856 Pg, 无机碳储存量远大于有机碳储存量, 这与其所处干旱环境有关(涂夏明等, 2012)。黄土中次生碳酸盐的形成过程可以作为一种有效的碳吸收机制, 将大气中的 CO₂ 转化为相对稳定的无机碳库。人类活动和土地利用对土壤有机碳库和无机碳库产生重要影响, 合理用土地及科学管理现代农业, 能够减少黄土高原土壤碳释放, 增加其碳吸收, 使之成为碳汇。因此, 应进一步开展土地利用和植被变化对土壤碳储量的影响研究, 并长期观测年内和年际气候变化对黄土碳储量的影响, 对土地资源可持续利用和土壤循环与全球气候变化的相互作用具有重要意义。

4 黄土高原碳汇系统科学研究展望

中国的碳达峰碳中和研究工作正在有序展开, 黄

土高原的碳汇调查研究目前还很薄弱。区域尺度的陆地生态碳汇和地质碳汇估算是一个难题, 亟需要组织技术力量对其进行攻关。自退耕还林还草的生态修复工程在黄土高原进行以来, 随着气候变化植被覆盖率的增加, 黄土高原的生态环境得到了有力的改善。

前期的调查显示黄土高原的脆弱生态区的生物量和土壤有机质得到了显著的提高, 生态系统碳汇也得到了初步的估算。然而, 目前黄土高原的碳汇调查研究仍有 5 个方面可以进一步改善: ①清查基础数据少, 目前仅有小范围的点状的土壤碳库的变化监测, 没有黄土高原区域尺度的碳库的变化数据。②要加强遥感技术对黄土高原碳汇调查研究的支撑作用。③多学科系统性的针对黄土高原碳汇潜力的研究, 厘清黄土高原碳汇现状和未来的碳汇潜力。④加强无机的地质碳汇的调查研究工作, 研究表明岩溶碳汇、黄土高原碱性土壤碳汇以及沙漠碳汇也是重要的碳汇组成。无机碳汇的形成机理和具体大小需要开展深入细致的调查研究工作。⑤西北地区具有大型沉积盆地、枯竭的油气田、深部卤水层等地质基础, 决定了该区具有包括矿物封存、溶解封存和物理空间封存等全面地质封存 CO₂ 的潜力(王国强等, 2023), 而黄土高原地区具有国内最好的 CO₂ 封存地质条件, 建议开展 CO₂ 捕集、驱油和埋存技术研究, 加强 CCUS 技术创新和工程实践, 助力国家“双碳”目标实现。

参考文献(References):

- 蔡兆男, 成里京, 李婷婷, 等. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 602-613.
- CAI Zhaonan, CHENG Lijing, LI Tingting, et al. Key Scientific and Technical Issues in Earth System Science Towards Achieving Carbon Neutrality in China[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 602-613.
- 陈骏, 王洪涛, 高燕, 等. 黄土高原中部 S1 古土壤次生碳酸盐稳定同位素组成与成因初探[J]. 科学通报, 1996, 41(14): 1297-1300.
- CHEN Jun, WANG Hongtao, GAO Yan, et al. Stable isotopic composition and genesis of S1 paleosol secondary carbonates in the central Loess Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(14): 1297-1300.
- 陈秀玲, 张文开, 肖宝玉. 黄土中碳酸盐的研究进展[J]. 新疆有

- 色金属, 2008, 31(4): 3.
- CHEN Xiuling, ZHANG Wenkai, XIAO Baoyu. Research progress of carbonate in loess[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2008, 31(4): 3.
- 程淑兰, 欧阳华, 牛海山, 等. 荒漠化重建地区土壤有机碳时空动态特征——以陕西省榆林市为例[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 505–513.
- CHENG Shulan, OUYANG Hua, NIU Haishan, et al. Temporal-spatial Dynamic Analysis of Soil Organic Carbon in Inversed Desertification Area: a case study in Yulin County, Shaanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 505–513.
- 邓蕾. 黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- DENG Lei. Response mechanism of ecosystem carbon sequestration to vegetation restoration in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究[R]. 2021.
- DING Zhongli. Research on China's carbon neutral Framework roadmap [R]. 2021.
- 董刚. 中国东北松嫩草甸草原碳水通量及水分利用效率研究[D]. 沈阳: 东北师范大学, 2011.
- DONG Gang. Carbon and water flux and water use efficiency in Songnen Meadow Steppe of Northeast China [D]. Shenyang: Northeast Normal University, 2011.
- 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学:D辑, 2007, 37(6): 804–812.
- FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. Science in China: Series D, 2007, 37(6): 804–812.
- 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土壤侵蚀控制制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1503–1515.
- GAO Haidong, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Potential of soil erosion control based on soil erosion control degree in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1503–1515.
- 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612–619.
- HAN Bin, WANG Xiaoke, LU Fei, et al. Current status and potential of carbon sequestration in farmland soil ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 612–619.
- 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 半干旱区岩溶碳汇原位监测方法适宜性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015a, 45(1): 240–246.
- HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, et al. Applicability of Karst Carbon Sinks Calculation Methods in Semi-Arid Climate Environment[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015a, 45(1): 240–246.
- 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨. 不同岩性试片溶蚀速率差异及意义[J]. 地球与环境, 2015b, 43(4): 7.
- HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu. Dissolution Rate and Its Significance of Different Lithological Tables[J]. Earth and Environment, 2015b, 43(4): 7.
- 黄奇波. 北方半干旱岩溶区岩溶碳汇过程及效应研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- HUANG Qibo. Study on the Carbon sequestration Process and Its Effect in the Semi-arid Karst Area of Northern China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- 贾旖旎. 基于DEM的黄土高原流域边界剖面谱研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2010.
- JIA Yini. Study on boundary profile spectrum of Loess Plateau Watershed based on DEM [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010.
- 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, (4): 299–305.
- JIANG Dingsheng, HUANG Guojun. Study on soil infiltration rate in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, (4): 299–305.
- 乐小芳, 陈佳淳, 苗璐. 农业土壤碳汇研究综述[J]. 农业与技术, 2020, 40(22): 8–10.
- 李妙宇. 黄土高原生态系统碳储量现状及固碳潜力评估[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
- LI Miaoyu. Assessment of carbon storage status and carbon sequestration potential in Loess Plateau ecosystems [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil, Water and Soil Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- 李巧玲, 阎欣, 吴秀芝, 等. 荒漠草原沙漠化对土壤无机碳和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 98–103.
- LI Qiaoling, YAN Xin, WU Xiuzhi, et al. Effects of desertification on soil inorganic carbon and organic carbon in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 98–103.
- 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8593–8605.
- LI Ting, LV Yihe, REN Yanjiao, et al. Effect and influencing factors of vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8593–8605.
- 李旭东. 黄土高原草地与农田系统土壤呼吸及碳平衡 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- LI Xudong. Soil respiration and carbon balance in grassland and cropland systems on the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- 梁二, 蔡典雄, 张丁辰, 等. 中国陆地土壤有机碳储量估算及其

- 不确定性分析[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (06): 75-79.
- LIANG Er, CAI Dianxiong, ZHANG Dingchen, et al. Terrestrial soil organic carbon storage in China: Estimates and uncertainty[J]. Soil and Fertilizer in China, 2010, (06): 75-79.
- 刘嘉麒, 钟华, 刘东生. 渭南黄土中温室气体组分的初步研究[J]. 科学通报, 1996, 41(24): 4.
- LIU Jiaqi, ZHONG Hua, LIU Dongsheng. Preliminary study on greenhouse gases in Weinan Loess[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(24): 4.
- 刘强, 刘嘉麒, 刘东生. 北京斋堂黄土剖面主要温室气体组分初步研究[J]. 地质地球化学, 2000, 28(02): 82-86.
- LIU Qiang, LIU Jiaqi, LIU Dongsheng. Primary research on major greenhouse gases in Zhaitang Loess section, Beijing[J]. Geology and Geochemistry, 2000, 28(02): 82-86.
- 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4002-4010.
- LIU Yingchun, GAO Xianlian, FU Chao, et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4002-4010.
- 刘再华. 大气 CO₂ 两个重要的汇[J]. 科学通报, 2000, 45(21): 4.
- LIU Zaihua. Two important sinks of atmospheric CO₂[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21): 4.
- 苗甜, 金雅琪, 王磊, 等. 黄土碳酸盐古气候意义及其研究展望[J]. 盐湖研究, 2021, 29(4): 10.
- MIAO Tian, JIN Yaqi, WANG Lei, et al. Paleoclimate significance of loess carbonate and its research prospect[J]. Salt Lake Research, 2021, 29(4): 10.
- 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384.
- PAN Genxing, ZHAO Qiguo. Study on the evolution of farmland soil carbon pool in China: global change and national food security[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384.
- 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2022a, 52(07): 1419-1426.
- PIAO Shilong, YUE Chao, DING Jinzhi, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy[J]. Science China Earth Sciences, 2022a, 52(07): 1419-1426.
- 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, 2022b, 52(06): 1010-1020.
- PIAO Shilong, HE Yue, WANG Xuhui, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022b, 52(06): 1010-1020.
- 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5428-5436.
- QI Libin, FAN Jun, SHAO Ming'an, et al. Seasonal variation of soil respiration and its environmental drivers in Different land use types in the water Erosion and wind Erosion ecotone of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5428-5436.
- 秦小光, 李长生, 蔡炳贵. 气候变化对黄土碳库效应影响的敏感性研究[J]. 第四纪研究, 2001, (02): 153-161.
- QIN Xiaoguang, LI Changsheng, CAI Binggui. Study on the sensitivity of climate change to Loess carbon pool effect[J]. Quaternary Sciences, 2001, (02): 153-161.
- 邵明玉, 张连凯, 刘朋雨, 等. 黄土区典型小流域矿物化学风化及碳汇效应[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 11.
- SHAO Mingyu, ZHANG Liankai, LIU Pengyu, et al. Mineral Dissolution and Carbon Sink Effect in a Typical Small Watershed of the Loess Area[J]. Earth and Environment, 2019, 47(5): 11.
- 宋超. 陕西省典型森林生态系统固碳速率及潜力研究[R]. 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
- SONG Chao. Study on carbon sequestration rate and potential of typical forest ecosystems in Shaanxi Province[R]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2015.
- 覃小群, 蒋忠诚, 张连凯, 等. 珠江流域碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气 CO₂ 汇的效应[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1749-1757.
- QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng, ZHANG Liankai, et al. Effects of weathering of carbonate and silicate rocks on atmospheric CO₂ sinks in the Pearl River Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1749-1757.
- 腾志宏, 张银玲. 黄土高原地下水资源与水质初步评价[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(1): 60-64.
- TENG Zhihong, ZHANG Yinling. Water resource and water quality evaluation of underground water in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2000, 30(1): 60-64.
- 涂夏明, 曹军骥, 韩永明, 等. 黄土高原表土有机碳和无机碳的空间分布及碳储量[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 114-118.
- TU Xiaming, CAO Junji, HAN Yongming, et al. Storage and spatial distribution of organic and inorganic carbon in the topsoil of Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environ-

- ment, 2012, 26(2): 114-118.
- 王国强, 李婷, 陈隽璐, 等. 中国西北地区超基性岩封存 CO₂ 潜力研究[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 186-193.
- WANG Guoqiang, LI Ting, CHEN Junlu, et al. Assessment of Carbon Dioxide Sequestration Potential of Ultramafic Rocks in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 186-193.
- 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- WEN Qizhong. Loess Geochemistry in China [M]. Beijing: Science Press, 1989.
- 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 硅酸盐风化与全球碳循环研究回顾及新进展[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(2): 215-224.
- WU Weihua, ZHENG Hongbo, YANG Jiedong, et al. Review and new progress of silicate weathering and global carbon cycle[J]. *Geological Journal of Chinese Universities*, 2012, 18(2): 215-224.
- 熊平生, 谢世友. 中国全球变化研究优势领域及进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2008, 24(3): 86-89+95.
- XIONG Pingsheng, XIE Shiyu. Research advances on global change in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, 24(3): 86-89+95.
- 杨黎芳, 李贵桐, 李保国. 土壤发生性碳酸盐碳稳定性同位素模型及其应用[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(09): 97-105.
- YANG Lifang, LI Guitong, LI Baoguo. Stable isotope model of soil-derived carbonate carbon and its application[J]. *Advance in Earth Science*, 2006, 21(09): 97-105.
- 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 等. 黄土高原生态分区及概况[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7389-7397.
- YANG Yanfen, WANG Bin, WANG Guoliang, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7389-7397.
- 于贵瑞, 王绍强, 陈泮勤, 等. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(5): 568-577.
- YU Guirui, WANG Shaoqiang, CHEN Panqin, et al. Isotope tracer approaches in soil organic carbon cycle research[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5): 568-577.
- 张龙军, 王宝森, 薛明, 等. 黄河流域硅酸盐风化的讨论(2)——流域耗水量对化学风化消耗大气 CO₂ 的贡献[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2011, 41(4): 109-115.
- ZHANG Longjun, WANG Baosen, XUE Ming, et al. Discussion on silicate weathering in the Huanghe River drainage basin(2): the contribution of water consumption to CO₂ consumption by silicate weathering [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(4): 109-115.
- 张晴, 李力. 我国净生态系统碳交换量 (NEE) 的时空变化特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(7): 3108-3109.
- ZHANG Qing, LI Li. Spatial-temporal variation characteristics of net ecosystem carbon exchange volume (NEE) in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(7): 3108-3109.
- 张崧. 黄土高原中部 60 万年来黄土—古土壤序列有机碳同位素研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008.
- ZHANG Song. Study on the Sequence of organic carbon Isotopes in the Paleosol of the Central Loess Plateau during the past 600 000 years [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- An Zhisheng. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 171-187.
- Avitabile V, Herold M, Heuvelink G B, et al. An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1406-1420.
- Beck J W, Zhou Weijian, Li Cheng, et al. A 550, 000-year record of East Asian monsoon rainfall from ¹⁰Be in loess[J]. *Science*, 2018, 360(6391): 877-881.
- Cerling T E, Quade J. Stable carbon and oxygen isotopes in soil carbonates [M]. *Climate Change in Continental Isotopic Records*, 1993.
- Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. “Grain for Green” driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 1-8.
- Ding Zhongli, Liu Tungsheng, Rutter N. et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800, 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(2): 149-159.
- Fan S, Gloor M, Mahlman J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models[J]. *Science*, 1998, 282(5388): 442-446.
- Feng X, Fu B, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1-5.
- Friedlingstein P, O'sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.
- Galdo I D, Six J, Peressotti A, et al. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(8): 1204-1213.
- Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1-4): 0-60.
- Guo Zhengtang, Biscaye P, Wei L, et al. Summer monsoon variations over the last 1. 2 Ma from the weathering of loess - soil

- sequences in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(12): 1751–1754.
- He N, Wen D, Zhu J, et al. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1575–1584.
- IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R], 2021.
- Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1285–1298.
- Khademi H. Submicroscopy and stable isotope geochemistry of carbonates and associated palygorskite in Iranian Aridisols[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 50(2): 207–216.
- Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China[J]. *Geoderma*, 2007, 138(1-2): 119–126.
- Li J, Li M, Dong L, et al. Plant productivity and microbial composition drive soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140802.
- Liu Z, Macpherson G L, Groves C, et al. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering [J]. *Earth Science Reviews*, 2018: 42–49.
- Maher K, Chamberlain C P. Hydrologic regulation of chemical weathering and the geologic carbon cycle[J]. *Science*, 2014, 343(6178): 1502–1504.
- Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988–993.
- Sun Y, Kutzbach J, An Z, et al. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 132–142.
- Wang X, Wang J, Xu M, et al. Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: pedogenic carbonate exceeding organic carbon[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11439.
- Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 720–723.
- Wu W, Zheng H, Yang J, et al. Chemical weathering, atmospheric CO₂ consumption, and the controlling factors in a subtropical metamorphic-hosted watershed[J]. *Chemical Geology*, 2013, 356: 141–150.
- Xiao J, Jin Z D, Zhang F. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30: 4855–4869.
- Yang L, Zhang F, Hu Y, et al. Seasonal Variations of Chemical Weathering and CO₂ Consumption Processes in the Headwater (Datong River Basin) of the Yellow River Draining the Tibetan Plateau [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10:.
- Yang Shiling, Ding Zhongli, Li Yangyang, et al. Warming-induced northwestward migration of the East Asian monsoon rain belt from the Last Glacial Maximum to the mid-Holocene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(43): 13178–13183.
- Yi Z, Fu S, Yi W, et al. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China[J]. *Forest Ecology & Management*, 2007, 243(2-3): 178–186.
- Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798–810.
- Zhang L K, Qin X Q, Liu P Y, et al. Estimation of carbon sink fluxes in the Pearl River basin (China) based on a water–rock–gas–organism interaction model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 945–952.
- Zhang F, Jin Z, Li F, et al. Controls on seasonal variations of silicate weathering and CO₂ consumption in two river catchments on the NE Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 547–560.
- Zhang Zeke, Li Gaojun, Cai Yanjun, et al. Millennial - Scale Monsoon Variability Modulated by Low - Latitude Insolation During the Last Glaciation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(1): e2021GL096773.
- Zhu Y, Jia X, Shao M, et al. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China[J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(4): 715–727.