

“双碳”目标下岩溶碳汇教学实践基地的构建与探索

杨明星

贵州理工学院资源与环境工程学院 贵州 贵阳 550025

[摘要]本文基于岩溶碳汇的“碳捕获-碳稳定-碳储存”耦合机制，结合内源与外源碳汇交互、DIC 施肥效应及土地利用类型影响等理论，以贵州省毕节市金沙县沙土镇中心社区为试点，构建岩溶碳汇教学实践基地。基地围绕水循环、DIC 形成与转化、OC 沉积等核心过程，系统解析水-岩-土-气-生相互作用下的碳汇机制。研究表明，该基地建设不仅能弥补高校岩溶碳汇实践教学空白，培养学生多学科交叉的观测分析与问题解决能力，还可为科研成果转化、区域碳汇评估及生态修复提供技术支撑，助力“双碳”目标下岩溶区绿色低碳发展。

[关键词]岩溶碳汇；水文地质学；教学实践基地；教学改革；“双碳”目标

[中图分类号] G641 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1687-9534 (2025)-0074-34 **[收稿日期]** 2025-05-06

一、引言

随着全球气候变化问题日益严峻，减少温室气体排放、实现碳达峰与碳中和已成为全球共识。2020 年 9 月，中国在第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标，即分别于 2030 年前和 2060 年前实现碳达峰和碳中和^[1]。在实现“双碳”目标的过程中，碳汇的作用至关重要^[2]。其中，岩溶碳汇是指碳酸盐岩风化消耗大气中的二氧化碳，形成溶解无机碳，并通过水文循环将其输送到海洋或其他储存库的过程。贵州省作为我国西南喀斯特中心，岩溶区面积约占陆地面积约 70%，岩溶碳汇对我国实现“双碳”目标具有重要意义^[3]。相关研究表明，全球碳酸盐岩风化溶解产生的碳汇通量为 5.5 亿吨/年，相当于全球森林碳汇通量的 33%、土壤碳汇通量的 70%。其中，中国碳酸盐岩出露区岩溶碳汇通量约

为每平方公里每年 6.93 吨碳，岩溶区产生的总碳汇为每年 1760 万吨碳^[4]。2021 年《中共中央国务院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》明确提出：“积极推动岩溶碳汇开发利用”；《2030 年前碳达峰行动方案》将岩溶碳汇纳入碳汇能力巩固提升行动。因此，研究岩溶碳汇对于我国实现“双碳”目标具有重要意义。然而，岩溶碳汇涉及地质学、环境科学、生态学等多学科交叉，但当前高校相关课程体系尚未完善，学生缺乏实地观测和技术应用能力。建设岩溶碳汇教学实践基地，是培养岩溶碳汇领域专业人才的重要举措。通过实践教学，学生可以深入了解岩溶碳汇的形成过程、影响因素和监测方法，掌握相关的实验技能和数据分析方法，提高解决实际问题的能力。同时，教学实践基地还可以为科研人员提供

开展岩溶碳汇研究的平台,促进科研成果的转化和应用^[5]。本研究基于岩溶碳汇的基本原理,在贵州省范围内选取了具备典型代表的毕节市金沙县沙土镇中心社区,作为教学基地拟建场所,综合岩溶发育、水化学测量、碳通量计算等过程,打造一个培养岩溶碳汇理论学习、监测分析以及计量评估的系统性人才教学培训基地,为贵州省培养“双碳”及岩溶碳汇的储备人才提供保障支撑。

二、岩溶碳汇基地建设的理论依据

从耦联碳酸盐岩风化水生光合碳汇的模式图可以看出,整个机制包含三个部分,即:

(1) 大气 CO_2 的捕获,主要通过碳酸盐岩风化碳汇实现,将 CO_2 转化为 DIC; (2) 碳的稳定:形成的 DIC 是不稳定的,因此,在水生植物光合作用下,将 DIC 转化为 OC,形成较为稳定的有机碳; (3) 碳的储存:形成的稳定有机碳随着沉积作用被埋藏到底部或随着地表水体迁移值海洋中。在以上整个机制中,是水-岩-土-气-生相互作用的结果,也受到整个环境条件的影响。

(一) 内源与外源碳汇

地表水体中的有机碳是较为稳定的碳汇,但是,土壤/岩溶地下水系统中的外源有机碳经表层岩溶带随水流溶蚀冲刷进入地表水后,与内源有机碳混合在一起,使得单独明确水生光合作用形成的内源有机碳汇变得困难。但是传统岩石风化碳汇估算方法将内源有机碳认为是土壤或岩石侵蚀而来的外源有机碳,进而严重低估岩石风化作用对碳汇的贡献。

因此目前流域生态系统中岩溶碳汇计算误差的一个原因可归结为内、外源有机碳混淆到一起,计算中只关注到无机碳,对内源有机碳未考虑,即忽视了内源碳汇的贡献^[9]。

(二) DIC 施肥效应

从内源有机碳汇的形成过程可看出其主要影响因素包含: DIC 来源、水生植物的生长状态以及外源有机碳输入。因土壤/岩溶地下水系统和地表系统的天然联系,不同土地利用方式形成的 DIC 及表层土壤有机碳冲刷输入差异均影响着地表水体中有机碳组成。研究表明,水体中的 DIC 存在促进水生光合作用的 DIC 施肥效应,即水体中 DIC 浓度越高,则其中水生光合作用越强烈,产生的内源有机碳越多^[7]。

(三) 不同土地利用类型的影响

在流域面积和岩性固定的情况下岩石风化碳汇的强度很大程度上受到土地利用和覆被变化的影响,因为绝大多数地表覆盖着土壤^[8]。土壤呼吸产生较高浓度的 CO_2 ,随土壤水下渗与碳酸盐岩反应从而成为了岩溶作用的最重要驱动因子之一。此外,土地利用类型又同时影响着土壤的水文特征,进而影响岩石风化碳汇强度的产出,这些因素的共同作用使得人类对土地利用方式的改变必将影响岩溶地质碳循环过程,调控着岩溶作用碳汇的强度。其主要影响因素可分为以下 3 个部分: (1) 土地利用与覆被变化对土壤 CO_2 浓度的影响; (2) 土地利用与覆被变化对径流的影响; (3) 土地利用与覆被变化带

来的外源酸对岩溶作用碳汇的影响。

三、教学基地建设内容及实践

(一) 教学基地的主要研究内容

基于耦联水生光合碳汇模式，在野外的观测站主要观测内容可简单划分为以下三类：

(1) 水循环过程：岩溶区因为岩溶地质作用而形成了以裂隙、溶隙为主要流水通道的水文地质特征，大气降雨经过地表入渗进入地下，并最终排泄入地表水体的过程，不断发生水-岩-土-气-生之间的相互作用，使得水量和水质不断变化，特别是在不同土地利用条件下，存在巨大差异。而水循环过程中的物质演变最为主要的步骤，正是碳循环。因此，在观测站中要测试气象信息、降雨入渗过程中的各项参数以及大气降雨-地下水-地表水三者之间的相互量化过程；(2) DIC 形成过程：岩溶水水循环过程驱动者碳循环，不断地将大气 CO_2 捕获到水体中，形成 DIC。因此，要观测此过程中 DIC (CO_2 (气态)、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) 含量的变化，以此分析不同土地条件下对 CO_2 的吸收差异；(3) DIC 转化为 OC 过程：当水体中含有 DIC 时，地表水体中的水生植物（浮游植物、沉水植物和挺水植物）均可在光合作用下，将 DIC 转化为有机碳 OC，进而形成稳定的碳汇。因此，观测此转化过程中的各项参数即可计算出稳定形成的碳汇量；(4) OC 沉积过程：水体中形成的 OC 会不断地沉积下来，形成最后的碳汇量。因此要观测不同土地利用下的水生参数，用以明确大气 CO_2 被岩石风化以及大气降雨

入渗过程携带进入地表水体并最终沉积的量。

具体操作为在选定区域地下水排泄进入地表水体的排泄口、水生植物生长区域断面以及其下游演变截断，总共两个区域（水生植物光合作用区、水化学过程演变区）三个控制观测断面。形成边界条件，可控制住流量、水化学参数、以及水生光合碳汇参数，最终可计算出相应的碳汇通量；在此基础上结合土地利用类型，即可得出该土地利用类型下的岩溶水生光合碳汇通量。

(二) 教学基地建设设计

根据教学基地建设的理论以及基本要求，本研究选择贵州省毕节市金沙县沙土镇中心社区王家坪溶洞区域作为建设点，该区域地形属高原丘陵，一般海拔 760~1096 米，年均降雨量约为 1000mm。境内河道保护属长江流域乌江水系的花滩河及三丈水河。地层主要为三叠系下统夜郎组 (T_1y)，岩性为灰色中至厚层灰岩。因研究区内主要为碳酸盐岩，岩溶发育强烈，于研究区南部发育一超大溶洞——王家坪溶洞，洞内有地下暗河，以泉水出口的形式流出，当地为合理利用该地下水，因地制宜地修建了水渠，作为农业产业园的供水。本项目主要选择具备岩溶泉水补给地表河流的生态环境进行观测断面的构筑，岩溶碳汇的三个步骤在建设基地分别对应：(1) 溶洞发育（碳捕获）、(2) 水生植物光合作用（碳稳定）以及(3) 植物沉积（碳储存）。对应地教学基地开展的主要教学实践内容包括：(1) 水通量研究，主要是

通过相关的自动观测仪器高分辨率记录气象与水文参数（降雨量、气温、空气湿度、地下水位和流量等参数）；（2）碳浓度研究，主要是通过仪器自动观测、人工现场滴定和水样室内化学分析相结合的工作方法，获取水化学指标（如 pH 值、水温、电导率、水中常见阴阳离子浓度等指标）。在以上两部分工作同时进行的过程中，同步开展应用稳定

同位素技术标示水-碳过程的工作，从而系统研究这些同位素指标与水-碳通量之间的内在联系。（3）水生植物系统研究，主要是测量水体中的水生植物量、溶解氧、叶绿素 a、氧化还原电位等。最后，将水通量与碳浓度相乘即可得到碳通量值，并可通过三类型数据之间的联系，讨论影响机制，研讨后续可以增加碳汇的人工调控模式。

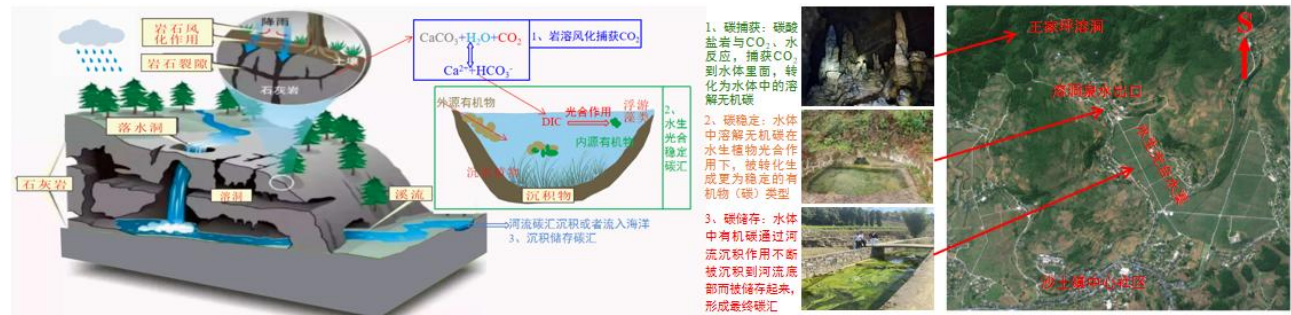


图 1 基于岩溶碳汇模式的教学实践基地建设示意图

四、 结束语

本文基于岩溶碳汇基本理论、影响因素等相关理论，结合岩溶碳汇对于“双碳”目标达成的重要性与目前国内高校关于岩溶碳汇教学工作欠缺的实际状况，通过实地考察选取了贵州省毕节市金沙县沙土镇中心社区王家坪溶洞区域作为岩溶碳汇教学实践基地建设点，初步构建了岩溶碳汇教学实践基地，并进行了实践教学内容的设计与规划，探讨了岩溶碳汇“教学-科研-实践”一体化模式，基地将成为岩溶碳汇领域人才培养、技术创新和政策咨询的重要平台，为我国岩溶区绿色低碳发展提供智力支持与实践范式。

基金项目：贵州省高等学校教学内容和课程体系改革项目（编号：2023223）；2. 贵州理工学院教育教学改革研究项目（编号：

XJJG-2022-22533）；3. 贵州省科技计划项目（编号：黔科合基础-ZK[2022]一般 186）。

作者简介：杨明星(1986-)，男，贵州金沙人，工学博士，贵州理工学院资源与环境工程学院教授，主要从事岩溶水文地质方面的研究工作。

参考文献：

[1] 谭显春, 郭雯, 樊杰, 等. 碳达峰、碳中和政策框架与技术创新政策研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37 (04) : 435-443.

[2] 黎明, 孔凡婕, 许策, 等. 土壤碳汇的相关概念辨析与定位[J]. 低碳世界, 2022, 12 (11) : 4-6.

[3] 韦延兰, 李文莉, 王莉. 岩溶碳汇对“碳达峰、碳中和”的意义[J]. 中国矿业, 2022, 31

- (S1):212-214.
- [4] 曾思博, 刘再华. 我国岩溶碳汇和在非岩溶区播撒碳酸盐粉的碳中和潜力[J]. 科学通报, 2022, 67(34):4116-4129.
- [5] 郑永春, 宋宇鹏, 李海涛. 新时代应用型高校“双创”教育实践基地建设模式研究[J]. 黑龙江农业科学, 2024, (08):86-90.
- [6] 杨明星, 刘再华, 孙海龙, 杨睿, 陈波. 基于生物标志物法的珠江流域有机碳溯源及 DIC 施肥效应研究[J]. 地球与环境, 2017, 45(01): 46-56.
- [7] Yang, M.; Liu, Z.; Sun, H.; Zhao, M.; He, H. Lipid Biomarker Investigation of the Delivery and Preservation of Autochthonous Organic Carbon in the Pearl River and Its Contribution to the Carbon Sink: Evidence from the Water and Surface Sediment[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 15392.
- [8] 曾思博, 蒋勇军. 土地利用对岩溶作用碳汇的影响研究综述[J]. 中国岩溶, 2016, 35(02):153-163.

Construction and exploration of karst carbon sink teaching practice base under the "double carbon" target

Yang Mingxing

(School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, Guizhou Province)

Abstract: This paper constructs a karst carbon sink teaching and practice base in Zhongxin Community, Shatu Town, Jinsha County, Bijie City, Guizhou Province, based on the "carbon capture-carbon stabilization-carbon storage" coupling mechanism of karst carbon sinks. Integrating theories such as the interaction between autochthonous and allochthonous carbon sinks, the dissolved inorganic carbon (DIC) fertilization effect, and the impact of land use types, the base focuses on core processes including the water cycle, DIC formation and transformation, and organic carbon (OC) deposition. It systematically analyzes the carbon sink mechanisms driven by the interaction of water, rock, soil, atmosphere, and biota. The study shows that the construction of this base not only fills the gap in practical teaching of karst carbon sinks in universities, cultivating students' interdisciplinary observation, analysis, and problem-solving abilities, but also provides technical support for the transformation of scientific research achievements, regional carbon sink assessment, and ecological restoration. It helps promote green and low-carbon development in karst regions under the "Dual Carbon" goals.

Key words: karst carbon sink; hydrogeology; teaching practice base; teaching reform; "double carbon" target