

蒋忠诚, 章程, 罗为群, 等. 我国岩溶地区碳汇研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 345-355.

DOI: 10.11932/karst20220302

我国岩溶地区碳汇研究进展与展望

蒋忠诚^{1,2,3}, 章程^{1,2}, 罗为群^{1,3}, 肖琼^{1,2}, 吴泽燕^{1,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 20世纪90年代, 我国率先开展了岩溶作用与碳循环研究。文章在系统总结相关研究进展的基础上, 阐明岩溶碳汇的原理, 提出基于地球系统科学理念的岩溶流域6种碳循环过程模式, 揭示了岩溶碳汇的稳定性并回答有关学者对岩溶碳汇的质疑, 从四大圈层的碳循环角度提出发掘岩溶地区碳汇潜力的新理念。在综述岩溶地区碳汇人工干预研究进展的基础上, 分析了石漠化综合治理、岩溶土壤改良、水生生物固碳、加速岩溶过程等人工干预措施的碳汇潜力及研究应用方面的不足。提出了下一步岩溶流域碳汇调查研究监测和技术创新发展方向, 以及固碳增汇试验示范工作思路。

关键词: 碳循环; 二氧化碳汇; 岩溶流域; 研究进展; 中国

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)03-0345-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

20世纪90年代初, 基于地球系统科学思想, 袁道先^[1]提出了从四大圈层相互作用角度来研究岩溶形成的思路, 由此推动了IGCP299“地质、气候、水文与岩溶形成”(1990-1994)项目的实施, 并创建了岩溶动力学理论^[2]。而岩溶动力系统的四大功能, 明确揭示岩溶作用对碳循环具有驱动作用^[3], 由此推动了IGCP379“岩溶作用与碳循环”(1995-1999)项目实施及岩溶碳汇的持续研究^[4-8]。中国岩溶面积346万km², 是世界上的岩溶大国, 岩溶作用强烈、岩溶地貌典型, 岩溶碳汇潜力巨大^[9-10]。30多年来, 包括岩溶作用与碳循环在内的很多岩溶研究成果居国际领先水平^[11-12]。究其原因, 一是归功于新中国的快速发展, 二是在岩溶动力学理论的指导下岩溶研究团队建设及研究能力迅速提升。

为实现“2030年前碳达峰, 2060实现碳中和”总

体发展目标, 2021年, 我国出台了《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》和《国务院2030年前碳达峰行动方案》两个重要文件, 岩溶碳汇被列入这两个文件中重要的汇项, 为岩溶碳汇深入研究与固碳增汇工程实践带来巨大的机遇。但是, 目前我国的岩溶碳汇评价主要反映的是碳-水-钙-生物四圈层自然循环过程的结果, 全国年岩溶作用产生大气二氧化碳汇仅约5000万t, 其中河流溶解无机碳约3700万t^[13], 河流水生生物固定的内源有机碳为水体无机碳20%左右, 水体沉积物的有机碳为水体无机碳10%左右^[8, 14]。而且, 岩溶碳汇量随环境而变化, 岩溶碳汇的稳定性被质疑^[15]。岩溶碳汇与其他生态过程碳汇的相关性以及人类如何干预岩溶碳汇的研究成果较少, 不足以支撑岩溶地区碳中和工程, 需要进一步发掘岩溶碳汇潜力与增汇途径, 才能有效服务国家“双碳”目标。为此, 本文通过梳理前期岩溶地区碳汇调查研究进

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0507504); 国际地球科学计划(批准号: IGCP661); 国家自然科学基金联合基金项目(批准号: U21A2016)

第一作者简介: 蒋忠诚(1962—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 岩溶生态学。E-mail: jzhongcheng@mail.cgs.gov.cn.

收稿日期: 2022-02-20

展, 坚定人们对岩溶地区碳汇重要性的认识, 提出发掘岩溶地区碳汇潜力及技术的新理念和研究方向, 为拓展岩溶碳汇研究思路和固碳增汇途径提供借鉴。

1 岩溶碳汇的原理与机制

1.1 岩溶碳汇原理及过程模式

岩溶碳汇由岩溶动力系统的碳—水—钙—生物相互作用所产生并得到固定, 由可溶岩(主要是碳酸盐岩)的岩石溶解过程驱动, 使二氧化碳(来自大气圈和生物圈)向水圈迁移和转化^[15-17], 具体表现为: 碳酸钙在二氧化碳和水流作用下发生化学反应, 形成重碳酸根和钙离子: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ 。在碳—水—钙循环产生岩溶碳汇的基础上, 刘再华等^[18]提出了基于流域的二氧化碳—水—钙—水生光合生物相互作用的碳酸盐风化碳汇模式, 拓展了通过水生光合作用的岩溶碳汇过程: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + x(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow + \text{COI} - x)(\text{CH}_2\text{O} \downarrow + \text{O}_2)$, 揭示了流

域系统岩溶碳汇的稳定性机制。上述化学反应和生物过程可不断消耗大气中的二氧化碳并转化为水体中的重碳酸根离子, 从而降低大气中的二氧化碳, 以水中无机碳的形式进入到河流、湖泊和海洋, 然后被水生植物所固定。由于碳酸盐岩的化学风化速率(岩溶作用)非常快, 在 1 h 内就能达到水流溶蚀饱和或过饱和状态^[18], 而且, 大气二氧化碳浓度越高, 岩溶作用越强, 产生的岩溶碳汇量越大^[19], 所以岩溶碳汇对于调节大气二氧化碳浓度具有重要意义。

近年来的深入研究揭示, 岩溶作用不但能够产生岩溶碳汇, 而且可以通过形成特殊的岩溶生态系统, 拓展碳循环途径^[20-25], 增加流域尺度岩溶碳汇通量^[26]。由此, 可提炼形成由六种碳循环过程构成的岩溶地区特有的碳循环过程模式(图 1)。六种碳循环过程中均有源汇途径(表 1), 在目前条件下, 岩溶空间、岩溶水系统、岩溶土壤系统、岩溶植物系统 4 种碳循环过程均能够实现碳汇效应, 岩溶沉积物及岩溶区人类活动 2 种碳循环过程虽然是源大于汇, 但通过岩溶技术研究, 碳汇潜力也很大, 因此, 岩溶碳

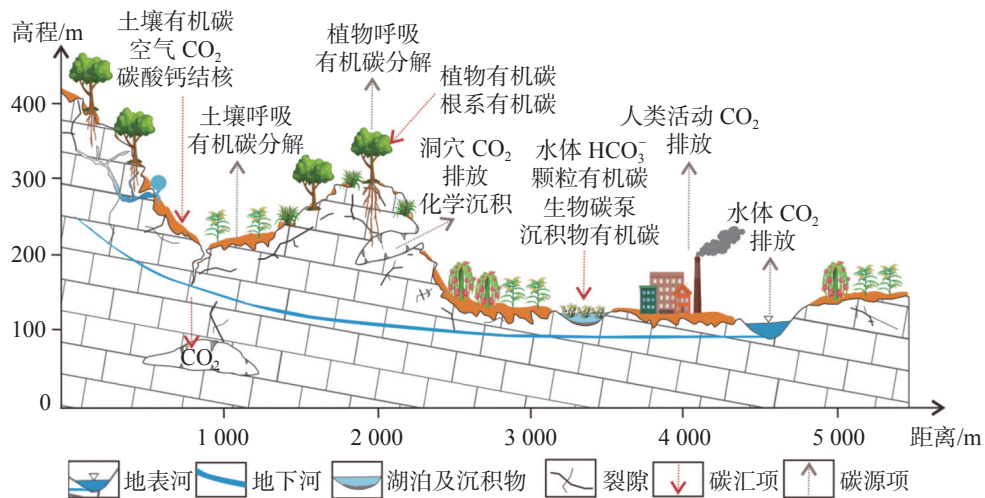


图 1 岩溶流域碳循环过程模式

Fig. 1 Carbon cycle process model of karst basin

表 1 流域尺度岩溶系统碳循环过程及其碳源汇效应

Table 1 Carbon cycle process and carbon source sink effect of karst system at watershed scale

序号	碳循环过程	碳源项	碳汇项	碳源汇效应
1	岩溶空间CO ₂ 循环	洞穴碳排放	洞穴空气碳封存	汇大于源
2	岩溶水系统碳循环	水体碳排放	重碳酸根、颗粒有机碳、生物碳泵	汇大于源
3	岩溶土壤系统碳循环	土壤呼吸、土壤有机碳分解	土壤有机碳、土壤空气CO ₂ 、碳酸钙结核无机碳	汇大于源
4	岩溶植物系统碳循环	植物呼吸、植物有机碳分解	植物有机碳、根系有机碳	汇大于源
5	岩溶沉积物碳循环	沉积过程碳排放	沉积物有机碳	源大于汇
6	岩溶区人类活动碳循环	产业碳排放、人类活动碳排放	碳排放岩溶吸收、碳地质封存	源大于汇

汇的潜力与稳定性机制可通过岩溶生态重建和岩溶生态技术的创新而得到大大加强。

1.2 岩溶碳汇的稳定性及对质疑者的答复

如果仅考虑岩溶作用过程的碳水钙循环,形成的水体无机碳的确存在不稳定性问题,主要原因有三:一是碳酸钙过饱和的水体,随着钙华沉积,导致二氧化碳释放^[27-28];三是随着水体中水温、pH等物理化学条件的改变产生二氧化碳、甲烷等脱气作用^[29-31];三是水体生物或微生物活动导致水体无机碳的转化,包括促进水生生物光合作用,形成水体颗粒有机碳和惰性有机碳^[32-36]。但是,水体无机碳的不稳定,不代表岩溶作用只造成碳转移,没有碳汇形成,这种错误认识,严重影响了社会各界对岩溶碳汇重要性的认可,必须加以澄清。第一种情况是造成错觉的主要根源,由于岩溶水会产生钙华沉积,就被人误认为岩溶作用在上游发生溶蚀吸收二氧化碳,在下游通过化学沉积就产生碳排放,岩溶作用就只促进碳转移,而不能形成碳汇^[15]。事实上过饱和水体主要发生在植被土壤覆盖下有压状态的岩溶地下水中,当水流流至洞穴或岩溶泉口会排放过饱和的二氧化碳^[37-39],但在地表河流、湖泊甚至海洋中,水体中的无机碳量一直保持与大气二氧化碳平衡状态,不会发生二氧化碳完全释放,而岩溶无机碳汇的计算从来都是基于这部分与大气平衡的碳通量^[40-44]。第二种情况是流域水系统碳—水—钙循环正常的表生地球化学过程,而且研究表明,水体最大的二氧化碳排放量不足无机碳的10%^[45-46],实际上也是碳-水-钙平衡的结果。第3种情况,也反映了岩溶作用不仅促进碳转移,而且在碳转移过程中存在固定机制,这种水生生物将水体无机碳为有机碳的机制,不但存在于陆地水体中^[17,32-36,47-48],也发生于海洋。所有入海的陆地无机碳多数被海洋生物固定^[49]。由此,岩溶作用不但能够促进碳转移,也产生碳汇,而且还有使岩溶碳汇稳定的系列机制^[50-51],岩溶碳汇作为大气二氧化碳去除的重要作用列入了IPCC第五次报告^[52]。

1.3 岩溶碳汇的内涵、拓展与外延

到目前为止,岩溶碳汇还没有明确的定义。20世纪末,岩溶碳汇主要是指碳酸盐岩化学风化碳汇,具体碳汇量计算主要考虑碳酸盐岩岩石化学风化吸收的大气二氧化碳产生的水体无机碳^[2-10]。21世纪

岩溶碳汇有拓展,除了河流排泄的无机碳之外,还包括流域内通过生物(微生物+水生生物)使无机碳转化的有机碳^[8,14,30-36],但岩溶碳汇的计算主要以流域为单元,但仍然局限于水系统范围,而且还对外源酸及水化学成分的影响进行深入的研究^[53-55]。近年来,研究发现,岩溶地区的植被恢复具有重大的碳汇效应^[56-58],但植物碳汇与岩溶过程有什么关系还没有开展系统的研究,但很多现象表明,如果没有岩溶作用,岩石很难长树,植物根系很难深展到地下深处。而且,岩溶地区还存在与岩溶作用密切相关的植物特殊的光合作用机制^[59],通过岩溶无机碳促进植物的生长和有机碳的积累。岩溶土壤内部有自己独特的水文地球化学和生物地球化学机制,不但可以产生碳酸钙沉积,还可以形成比非岩溶地区更高浓度的有机质和有机碳^[60-63,22]。此外,岩溶作用形成的洞穴、地下河岩溶管道等地下空间可以富集高浓度的CO₂^[64-66],并为二氧化碳的地质封存提供了有利空间条件。

因此,在双碳目标下,不能再局限于从水循环角度的调查研究岩溶碳汇,应当有更开阔的视野,从地球系统科学角度,至少是从地球关键带的尺度,从四大圈层的碳循环角度深入发掘岩溶作用产生的碳转移及其固碳增汇的潜力和途径^[67-68],尤其要重视碳汇潜力巨大的岩溶生态系统(包括地上和地下)和岩溶土壤系统的碳汇研究。

2 岩溶地区碳汇的人工干预

虽然自然条件下岩溶作用可以产生碳汇,但量级相对较低,离满足国家“双碳”目标的要求差距较大。但从上述分析讨论中可以看出,岩溶作用开拓了多个方面的碳循环路径,尤其是我国岩溶面积辽阔,岩溶作用强度大,为发掘岩溶地区固碳增汇的潜力提供了极为有利的条件。生态环境部发布的《中国应对气候变化的政策与行动2019年报告》中提出,“自然资源部积极探索人工造林种草、土壤改良、外源水灌溉及水生植物培育等4种增加岩溶碳汇的方法”,这对于开拓岩溶碳汇研究思路具有非常重要的积极意义^[69]。然而,最近的研究表明,4种措施中,人工造林种草措施需要进一步聚焦,才能取得更好的固碳增汇效果;土壤改良的目标和措施有待进一步明确,才能发挥更大的固碳增汇潜力;外源水灌溉措

施必须有跨流域调水的理念或工程措施才能真正实现增汇效应,因为在一个流域内岩溶作用是全覆盖的,无论是岩溶地区还是非岩溶地区均有化学风化作用^[70-71],无论是上游的外源水还是下游的岩溶水,最后在流域出口水流均达到碳—水—钙平衡态,流域内区分外源水和内源水,有助于分析岩溶过程及其时空差异,而对于流域岩溶碳汇量的计算没有实际意义;水生植物培育措施如何快速形成显著的固碳增汇效应还有待进一步研究。因此,岩溶碳汇的人工干预措施和技术需要进一步研究,而且,为了国家“双碳”目标的实现,岩溶碳汇必须拓展到岩溶地区的碳汇,加强岩溶碳汇与岩溶地区其他碳汇潜力的结合研究,进一步开辟岩溶地区固碳增汇的人工干预技术途径。

2.1 石漠化综合治理

石漠化综合治理是岩溶地区重要的国家生态工程,自本世纪初石漠化治理工程实施以来,不但有效推动了西南岩溶地区的石漠化治理与生态修复,同时也取得了巨大的固碳增汇效应,西南岩溶地区的固碳增汇贡献在全球具有领先地位^[58]。石漠化综合治理的碳汇效应包括三个方面,植被碳汇、土壤碳汇和岩溶碳汇^[71-72]。虽然西南岩溶石漠化治理区植被碳汇的研究已经形成较多成果和较大影响^[56-58,73-74],但石漠化治理产生的地下植物根系碳汇效应还缺乏研究。石漠化治理的土壤碳汇和岩溶碳汇的研究还处于探索阶段,但典型地区的研究结果表明,石漠化治理的土壤碳汇量远大于植被碳汇^[75-77],可是没有在整个西南岩溶地区开展研究。石漠化治理的岩溶碳汇也是明显的,如打狗河流域两岸,植被覆盖率好的地区,其地下河的岩溶碳汇比石漠化地区的地下河高十倍以上^[78]。岩溶地区碳循环地质调查表明,西南地区“十一五”期间的石漠化治理工程,增加当地流域 1000 万 t CO₂ 的岩溶碳汇^[79],但这部分岩溶碳汇如何有效固定和利用目前还缺乏研究。由此可见,西南岩溶石漠化治理在植被碳汇、土壤碳汇和岩溶碳汇三方面均取得了显著效果,但研究程度还不够,具有巨大碳汇潜力的固碳增汇示范工程亟需开展试验示范。

2.2 岩溶土壤改良

岩溶地区的森林土壤有机质和有机碳非常丰富,表层土壤有机质含量可达 20%,下部土壤也可达

2%~8%,均为非岩溶地区的 2 倍左右^[80-81]。但在岩溶石漠化区,土壤层瘠薄,厚度多在 50cm 以下,且经常为裸岩所间隔呈不连续状分布,而土壤有机碳含量很低,常在 2% 以下^[75-76]。除了岩溶土壤退耕和通过植被恢复可增加土壤有机碳含量措施外^[82],岩溶区土壤改良也可大幅度增加土壤有机质,形成土壤碳汇,同时还可促进岩溶碳汇。研究表明,秸秆还田、施有机肥和免耕措施,可增加土壤有机碳 50 t·km⁻²·a⁻¹ 以上^[83]。在广西平果县果化生态修复示范区通过使用淤泥、有机肥、秸秆等方式进行的土壤改良试验结果表明,利用池塘淤泥进行岩溶土壤改良的效果较好,不但增加土壤有机碳 80 t·km⁻²·a⁻¹,而且增加岩溶碳汇 1.93~2.70 t·km⁻²·a⁻¹^[84]。但是,岩溶土壤改良增汇研究与试验工作还很薄弱,岩溶土壤增汇的机理、土壤碳汇评价方法和土壤管理及改良技术均有待深入研究。业也证明,土地利用方式调整及土壤改良能够产生可观的岩溶碳汇潜力^[85-87],但这部分岩溶碳汇如何固定和有效利用?有待进一步深入研究和技术创新。

2.3 水生生物固碳

近年来对岩溶区溪流、河流、湖泊、水库水体的物理化学指标和稳定同位素高分辨率的监测结果表明,这些岩溶水体的水生生物通过光合作用形成生物碳泵效应^[31-36,88-90],而岩溶水的高浓度溶解无机碳对水生生物生长起着施肥作用^[14,91]。水生植物的生物碳泵作用不仅促进无机碳向有机碳的转化,而且减少了水气界面的 CO₂ 向大气排放^[45-46,92]。通过水体生物碳泵作用,不但能够产生相当于水体无机碳 30% 左右的内源有机碳^[8,14,93],而且为水体沉积物提供有机碳源,产生水体沉积物碳汇^[14,94]。进一步研究表明,通过水体好氧不产氧细菌等微生物作用可使水体有机碳固定为惰性有机碳,增强碳汇的稳定性。

作为水生生物固碳的人工干预措施还没有实施。目前的相关研究主要聚焦于水生植物的选择,以提高水体无机碳(HCO₃⁻)向有机碳转化的效率^[8,95]。调查发现,岩溶地下河出口的水生植物种类非常丰富,具有海菜花、黑藻、苦草、竹叶眼子菜、狐尾藻等优势种,其中竹叶眼子菜的固碳能力相对较大^[96-97]。而岩溶湿地以华克拉沙的固碳能力最大^[8]。但这些研究成果如何用于人工干预工程,在可操作性与经济可行性等方面缺乏论证,有待进一步探索。总体说来,

水生生物培育和繁殖应与水环境污染治理结合起来,既有利于净化水体环境,又有利于水生生物固碳,以增强经济上的可行性。此外,水生生物固碳增汇速率和效率如何提高?则是需要解决的关键技术问题。

2.4 加速岩溶过程的碳酸酐酶增汇技术

研究发现,作为一种生物酶,碳酸酐酶(CA)广泛存在于岩溶区植物、土壤和水环境中,将其收集利用,进行碳酸酐酶施肥可加速岩溶作用及生物固碳作用^[98-99]。试验研究表明,利用碳酸酐酶施肥增汇效果可提高1个数量级^[100-102]。因此,碳酸酐酶技术通过加速岩溶过程在石漠化治理、土壤改良、水生生物培育的固碳增汇中有广阔的应用前景。目前,如何实施工厂烟尘的碳减排成为新的研究热点,如何利用岩溶过程于碳减排是前沿技术研发领域,其中的技术难点是在烟尘排放过程中加速碳-水-钙反应过程,以更大程度捕捉烟尘中的二氧化碳成分,对此,利用碳酸酐酶技术可发挥重要作用。

3 展望

3.1 岩溶流域的碳循环调查研究与监测

岩溶流域的6种碳循环过程还没有展开,因此,必须加强岩溶流域的碳循环基础研究。首先,开展不同生态类型岩溶流域碳循环调查,以岩溶地区碳汇潜力大和碳排放问题比较突出的流域重点,以“地质作用-生态过程-人类活动”耦合系统碳收支现状和潜力为目标,查明流域内在岩溶地质系统、不同类型生态系统、人类生产生活活动过程的二氧化碳释放项和吸收项及其影响因素,查明碳排放条件下流域无机-有机碳的循环过程及碳汇潜力。其次,开展流域尺度6种碳循环过程研究,在建立不同类型岩溶流域大气-降水-植被-土壤-洞穴及管道-岩溶水全链条碳循环过程模型的基础上,深化四大圈层界面碳循环过程研究,尤其是大气-岩溶水-植被系统碳循环、大气-植物-土壤系统碳循环、大气-岩溶水-水生植物系统碳循环过程及其影响因素研究,为发掘岩溶地区碳汇潜力和固碳增汇技术提供科学依据。第三,利用先进的自动化监测仪器,开展6种碳循环过程及其影响因素监测,在我国重点岩溶区面上遥感监测及前期碳循环监测站建设的基础上,建立完善我国典型岩溶流域碳循环长期监

测网,监测岩溶流域6种碳循环过程及其影响因素的野外高分辨率在线监测体系,监测碳排放条件下6种碳循环过程的不同碳形态的时空动态及其生态环境变化,揭示不同碳排放强度下的岩溶地区碳循环过程响应过程、源汇动态变化规律及其对生态环境的影响。第四,利用信息技术,建立岩溶流域碳循环及碳收支数据库及信息系统,融合国土空间基本单元信息,构建服务国土空间规划和生态修复的岩溶流域碳中和调控决策大数据和管控平台。

3.2 岩溶流域碳汇评估体系构建

通过流域大气二氧化碳浓度、岩溶作用强度、有效降雨量等区域指标,探索流域碳-水-钙平衡的岩溶碳汇评价方法,以增强岩溶碳汇评估模型的普适性和可考核性。在调查监测的基础上,探索不同类型岩溶流域植被(地上、地下)碳汇、土壤(无机、有机)碳汇、水体有机碳碳汇、洞穴空气二氧化碳碳汇的评价方法,取得岩溶碳汇评价的科技创新,为全面把握岩溶流域的碳汇和进一步发掘岩溶碳汇潜力提供科技支撑。岩溶流域类型多样、地表地下空间结构复杂,碳循环过程交叉重复,建立公认的岩溶流域碳汇评价模型难度较大,因此,虽然岩溶流域碳汇评估体系构建前景广阔,但任重道远,需要国家和社会的大力支持,设立多学科交叉研究专项,才能尽快取得新得技术突破。

3.3 固碳增汇颠覆性技术研发与试验示范

岩溶地区碳汇潜力巨大,但人工干预措施尚未展开实施,需要加大力度开展岩溶地区固碳增汇技术的探索和研发。其中,有的技术已有研究基础,如石漠化生态修复固碳技术、岩溶植被筛选固碳技术、岩溶土壤改良固碳技术、岩溶水生植物选择和培育技术等;而有些方面的技术还没有开展研究,但他们可能是颠覆性技术,如烟尘二氧化碳的岩溶作用快速固定技术,岩溶碳汇的土壤和植被固定与转化技术,岩溶空间地下植物根系培植固碳技术等。

固碳增汇技术研发应当与试验示范有机结合。选择我国碳排放严重且岩溶碳汇潜力大的地区,以流域为单元,建立典型岩溶流域固碳增汇试验示范区,通过石漠化治理、岩溶森林重建、土地利用调整、岩溶土壤改良、水生植物培育、烟尘碳回收固定等措施的固碳增汇试验,形成流域“可测量、可报告、可核实”的岩溶流域固碳增汇技术体系,并通过流域

自然—人工二元系统的综合调控,构建典型岩溶流域碳中和示范样板。

参考文献

- [1] Yuan Daoxian, Zhu Dehao, Weng Jintao, *et al.* Karst of China. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [2] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 1-6. YUAN Daoxian. Carbon cycle and global karst[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(1): 1-6.
- [3] 袁道先. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002. YUAN Daoxian. Karst dynamic system in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [4] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(3): 223-232. YUAN Daoxian. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(3): 223-232.
- [5] 袁道先. 道岩溶作用与碳循环”研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 425-432. YUAN Daoxian. Progress in the study on karst processes and carbon cycle[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(5): 425-432.
- [6] JIANG Z, YUAN D. Source-sink in karst processes in karst areas of China[J]. *Episodes*, 1999, 22: 33-35.
- [7] 袁道先, 蒋忠诚. IGCP3792岩溶作用与碳循环”在中国的研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(1): 49-51. YUAN Daoxian, JIANG Zhongcheng. Review on the research progress of the IGCP 379 project “Karst Processes and the Carbon Cycles” in China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(1): 49-51.
- [8] 章程, 汪进良, 肖琼, 等. 岩溶碳循环与流域地球化学过程[M]. 北京: 地质出版社, 2021. ZHANG Chen, WANG Jinliang, XIAO Qiong. Karst carbon cycle and basin geochemical process[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- [9] 蒋忠诚, 蒋小珍, 雷明堂. 运用GIS和溶蚀试验数据估算中国岩溶区大气CO₂的汇[J]. *中国岩溶*, 2000, 19(3): 212-217. JIANG Zhongcheng, JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Estimation of atmospheric CO₂ sink of karst areas in China based on GIS and limestone tablet loss data[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(3): 212-217.
- [10] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. *地球学报*, 2012, 33(4): 129-134. JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua, QIN Xiaozhen, HE Shiyi, ZHANG Cheng. A Study of carbon sink capacity of karst processes in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(4): 129-134.
- [11] 章程, 蒋忠诚, Chris Groves, 袁道先. 岩溶IGCP国际合作30年与岩溶关键带研究展望[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 301-306. ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng, Chris Groves, YUAN Daoxian. 30 years international cooperation with IGCP and perspectives of karst critical zone research[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 301-306.
- [12] 李强. 基于文献计量学分析2016年度岩溶学研究热点[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(5): 535-545. LI Qiang. Research hotspots of karst in 2016 based on bibliometrics analysis[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(5): 535-545.
- [13] 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 蒋小珍, 何师意, 罗为群. 中国岩溶作用产生的大气CO₂碳汇的分区计算[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 363-367. JIANG Zhongcheng, QIN Xiaozhen, CAO Jianhua, JIANG Xiaozhen, HE Shiyi, LUO Weiqun. Calculation of atmospheric CO₂ sink formed in karst progresses of the karst divided regions in China[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 363-367.
- [14] 刘再华, 曾庆睿, 陈波, 贺海波. 碳酸盐风化碳汇研究. 北京: 科学出版社, 2021. LIU Zaihua, ZENG Qingrui, CHEN Bo, HE Haibo. Research on carbonate weathering carbon sink[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [15] Curl R L. Carbon shifted but not sequestered[J]. *Science*, 2012, 335: 655.
- [16] 徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体CO₂源汇关系的初步估算[J]. *科学通报*, 1997, 42(9): 953-956. XU Shengyou, JIANG Zhongcheng. Preliminary estimation of the relationship between karst process and the source sink of atmospheric greenhouse gas CO₂ in China [J]. *Science Bulletin*, 1997, 42(9): 953-956.
- [17] 何师意, 徐胜友, 张美良. 岩溶土壤中CO₂浓度、水化学观测及其与岩溶作用的关系[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4): 319-324. HE Shiyi, XU Shengyou, ZHANG Meiliang. Observation on soil CO₂ concentration, hydrochemistry, and their relationship with karst processes[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(4): 319-324.
- [18] Liu Z, Macpherson G L, Groves G *et al.* Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering. *Earth Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [19] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. *热带地理*, 1998, 18(4): 322-326. JIANG Zhongcheng. Features of epikarst zone in south China and formation mechanism[J]. *Tropical Geography*, 1998, 18(4): 322-326.
- [20] Hoffer-French K J, Herman J S. Evaluation of hydrological and biological influences on CO₂ fluxes from a karst stream[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 108(1): 189-212.
- [21] Zhongcheng Jiang, Yanqing Lian, Xiaoqun Qin. Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China. *Environmental earth sciences*, 2013(68): 151-158.
- [22] 曹建华, 周莉, 杨慧, 卢茜, 康志强. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(3): 431-437. CAO Jianhua, ZHOU Li, YANG Hui, LU Qian, KANG Zhiqiang. Comparison of soil carbon migration and karst car-

- bon sink effect between Maocun karst area and clastic rock area in Guilin[J]. *Quaternary Research*, 2011, 31(3): 431-437.
- [23] 张莹,李强.是“岩溶碳汇”还是“岩溶碳通量”?[J].中国岩溶, 2015, 34(6): 539-542.
ZHANG Ying, LI Qiang. Is it karst carbon sink or karst carbon flux?[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 539-542.
- [24] 王世杰,刘再华,倪健,闫俊华,刘秀明.中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J].地球与环境, 2017, 45(1): 2-9.
WANG Shijie, LIU Zaihua, NI Jian, YAN Junhua, LIU Xiuming. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 2-9.
- [25] JIANG Zhongcheng, ZHANG Cheng, QIN Xiaoqun, PU Junbing, BAI Bing. Structural Features and Function of Karst Critical Zone[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(supp. 1): 109-112.
- [26] 吴泽燕,章程,蒋忠诚,罗为群,曾发明.岩溶关键带及其碳循环研究进展[J].地球科学进展, 2019, 34(5): 488-498.
WU Zeyan, ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, ZENG Faming. Advance of karst critical zone and its carbon cycle[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 488-498.
- [27] Atkinson T C. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: An important control of groundwater hardness in limestones[J]. *Journal of Hydrology*, 1977, 35(1): 111-123.
- [28] 刘再华,Chris G,袁道先,Joe Meiman,姜光辉,何师意.水—岩—气相互作用引起的水化学动态变化研究:以桂林岩溶试验场为例[J].水文地质工程地质, 2003, 3(4): 13-18.
LIU Zaihua, Chris GROVES, YUAN Daoxian, Joe MEIMAN, JIANG Guanghui, HE Shiyi. Study on the hydrochemical variations caused by the water-rock-gas interaction: An example from the Guilin Karst Experimental Site[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 3(4): 13-18.
- [29] Liu Z, Li Q, Sun H, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO₂ and dilution effects[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337: 207-223.
- [30] 莫雪,蒲俊兵,袁道先,章程,何师意,于爽,刘文,张陶,周建超,杨会,唐伟.亚热带典型岩溶区地表溪流溶解无机碳昼夜变化特征及其影响因素[J].第四纪研究, 2014, 34(4): 873-880.
MO Xue, PU Junbing, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, HE Shiyi, YU Shi, LIU Wen, ZHANG Tao, ZHOU Jianchao, YANG Hui, TANG Wei. Diurnal variation characteristics and influencing factors of dissolved inorganic carbon in surface streams in typical karst areas of subtropical zone[J]. *Quaternary Research*, 2014, 34(4): 873-880.
- [31] ZHANG Tao, Li Jianhong, PU Junbing, Jonathan B. Martin, Mitra B. Khadka, Wu Feihong, LI Li, JIANG Feng, HUANG Siyu, YUAN Daoxian. River sequesters atmospheric carbon and limits the CO₂ degassing in karst area, Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 92-102.
- [32] Khadka M B, Martin J B, Jin J. Transport of dissolved carbon and CO₂ degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 391-402.
- [33] 章程.岩溶区河流水化学昼夜变化与生物地球化学过程[J].中国岩溶, 2015, 34(1): 1-8.
ZHANG Cheng. Diel aqueous chemistry and biogeochemical processes in streams of karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(1): 1-8.
- [34] 李瑞,于爽,孙平安,何师意,原雅琼,熊志斌.贵州茂兰板寨水域水生植物δ¹³C特征及光合作用固定HCO₃⁻碳量估算[J].中国岩溶, 2015, 34(1): 9-16.
LI Rui, YU Shi, SUN Ping'an, HE Shiyi, YUAN Yaqiong, XIONG Zhibin. Characteristics of δ¹³C in typical aquatic plants and carbon sequestration by plant photosynthesis in the Banzhai catchment, Maolan of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(1): 9-16.
- [35] LI Qiang, SONG Ang, PENG Wenjie, JIN Zhenjiang, Müller Werner E G, WANG Xiaohong. Contribution of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria to total organic carbon pool in aquatic system of subtropical karst catchments, Southwest China: Evidence from hydrochemical and microbiological study[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, 93(6): 1-8.
- [36] ZHAO Haijuan, XIAO Qiong, ZHANG Cheng, ZHANG Xinghua, WU Xia. Transformation of DIC into POC in a karst river system: evidence from δ¹³C DIC and δ¹³C POC in Lijiang, Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79: 295.
- [37] Baldini J U L, Baldini L M, Mcdermott F, Clipson N. Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra Cave, Ireland[J]. *Journal of Cave & Karst Studies*, 2006, 68(1): 4-11.
- [38] PU Junbing, YUANG Daoxian, ZHAO Heping, SHEN Licheng. Hydrochemical and pCO₂ variations of a cave stream in a subtropical karst area, Chongqing, SW China: Piston effects, dilution effects, soil CO₂ and buffer effects[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(9): 4039-4049.
- [39] 王晓晓,殷建军,徐尚全,沈立成.雪玉洞上覆土壤CO₂变化及对表层岩溶泉水化学特征的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(2): 85-89.
WANG Xiaoxiao, YIN Jianjun, XU Shangquan, SHEN Lichen. The Variations of Soil CO₂ and Hydrochemistry of Epikarst Spring Above Xueyu cave[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 85-89.
- [40] 邱冬生,庄大方,胡云锋,姚锐.中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算[J].地球科学, 2004, 29(2): 177-182.
QIU Dongsheng, ZHUANG Dafang, HU Yunfeng, YAO Rui. Estimation of Carbon Sink Capacity Caused by Rock Weathering in China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 177-182.
- [41] ZENG C, LIU Zaihua, ZHAO Min, YANG Rui. Hydrologically-driven variations in the karst-related carbon sink fluxes: Insights from high resolution monitoring of three karst catch-

- ments in Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 74-90.
- [42] 曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探: 以珠江流域为例[J]. *科学通报*, 2011, 56(26): 2181-2187.
- CAO Jianhua, YANG Hui, KANG Zhiqiang. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(26): 2181-2187.
- [43] 覃小群, 刘朋雨, 黄奇波, 张连凯. 珠江流域岩石风化作用消耗大气\土壤CO₂量的估算[J]. *地球学报*, 2013, 34(4): 455-462.
- QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, HUANG Qibo, ZHANG Liankai. Estimation of atmospheric/soil CO₂ consumption by rock weathering in the Pearl River valley[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(4): 455-462.
- [44] JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, CAO Jianhua, HE Shiyi, ZHANG Cheng, ZHANG Qiang. Carbon sink effects of karst processes in global carbon cycle[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35 (Supp.): 1-12.
- [45] PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao, XIONG Xiaofeng, YUAN Daoxian. High spatial and seasonal heterogeneity of P_{co2} and CO₂ emissions in a karst groundwater-stream continuum, Southern China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26(11): 11029-11041.
- [46] Zhang Tao, LI Jianhong, PU Junbing, YUAN Daoxian. Carbon dioxide exchange and the controlling factors in Guijiang River, SW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124073.
- [47] LIU Zaihua, Dreybrodt W. Significance of the carbon sink produced by H₂O-carbonate-CO₂-aquatic phototroph interaction on land[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(2): 182-191.
- [48] 章程, 谢运球, 宁良丹, 玉宏, 汪进良, 李凤. 桂林会仙岩溶湿地典型水生植物δ¹³C特征与固碳量估算[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(3): 247-252.
- ZHANG Cheng, XIE Yunqiu, NING Liangdan, YU Hong, WANG Jinliang, LI Feng. Characteristics of δ¹³C in typical aquatic plants and carbon sequestration in the Huixian karst wetland, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(3): 247-252.
- [49] Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Review Microbiology*, 2012, 8(8): 593-599.
- [50] 章程. 岩溶作用时间尺度与碳汇稳定性[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 368-371.
- ZHANG Cheng. Time-scale of karst processes and the carbon sink stability[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 368-371.
- [51] 张强. 岩溶地质碳汇的稳定性: 以贵州草海地质碳汇为例[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 947-952.
- ZHANG Qiang. The stability of carbon sink effect related to carbonate rock dissolution: A case study of the Caohai Lake geological carbon sink[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(6): 947-952.
- [52] 蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 章程. 岩石风化碳汇研究进展: 基于IPCC第五次气候变化评估报告的分析[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(10): 1081-1090.
- PU Junbing, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Some opinions on rock-weathering-related carbonsinks from the IPCC fifth assessment report[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(10): 1081-1090.
- [53] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田. 非岩溶水和硫酸参与溶蚀对湘南地区地下河流域岩溶碳汇通量的影响[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(3): 307-318.
- HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, ZHANG Liankai, SU Chuntian. The influence of allogenic water and sulfuric acid to karst carbon sink in karst subterranean river in Southern Hunan[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(3): 307-318.
- [54] 孙平安, 李秀存, 于爽, 原雅琼, 何师意, 王艳雪. 酸雨溶蚀碳酸盐岩的源汇效应分析: 以广西典型岩溶区为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 101-108.
- SUN Ping'an, LI Xiucun, YU Shi, YUAN Yaqiong, HE Shiyi, WANG Yanxue. Study on source-sink effect in the process of carbonate rock dissolved by acid rain: An example of typical karst regions in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 101-108.
- [55] 覃小群, 蒋忠诚, 黄奇波, 张连凯, 刘朋雨, 梁永平. 硫化物风化产酸对流域岩石风化和碳循环的影响: 以黄河支流三川河流域为例[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(4): 1070-1082.
- QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng, HUANG Qibo, ZHANG Liankai, LIU Pengyu, LIANG Yongping. The influence of sulfide acid on rock weathering and carbon cycle in catchment scale: A case study in Sanchuan River basin of Huanghe River tributary[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(4): 1070-1082.
- [56] WANG Jing, LIANG Feng, Palmer P I, LIU YI, FANG Shuangxi, Hartmut Bösch, Christopher W. O'Dell, TANG Xiaoping, YANG Dongxu, LIU Lixin, XIA ChaoZong. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 2020, 586: 720-723.
- [57] TONG Xiaowei, Martin Brandt, YUE Yuemin, Stephanie Horion, WANG Kelin, DE Wanda Keersmaecker, TIAN Feng, Guy Schurgers, XIAO Xiangming, LUO Yiqi, CHEN Chi, Ranga Myneni, SHI Zheng, CHEN Hongsong & Rasmus Fensholt. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018(1): 44-50.
- [58] TANG Xuguang, XIAO Jingfeng, MA Mingguo, YANG Hong, LI Xing, DING Zhi, YU Pujia, ZHANG Yongguang, WU Chaoyang, HUANG Jing, Julian R. Thompson. Satellite evidence for China's leading role in restoring vegetation productivity over global karst ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*. 2022, 507 (1): 1-13.
- [59] 吴沿友, 邢德科, 刘莹. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 273-277.
- WU Yanyou, XING Deke, LIU Ying. The Characteristics of Bicarbonate Used by Plants[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 273-277.

- [60] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. *科技通报*, 1999(5): 330-332.
PAN Genxing. Study on carbon reservoir in soils of china[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999(5): 330-332.
- [61] 潘根兴, 曹建华, 何师意, 滕永忠, 徐胜友. 岩溶土壤系统对空气 CO₂ 的吸收及其对陆地系统碳汇的意义:以桂林丫吉村岩溶试验场的野外观测和模拟实验为例[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 580-587.
PAN Genxing, CAO Jianhua, HE Shiyi, TENG Yongzhong, Xu Shengyou. Sink effect of karst soil system on atmospheric CO₂: Evidence from field observation and simulation experiment[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences Beijing)*, 2000, 7(4): 580-587.
- [62] 潘根兴, 孙玉华, 滕永忠, 陶于祥, 韩富顺, 曹建华, 何师意. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 70-73.
PAN Genxing, SUN Yuhua, TENG Yongzhong, TAO Yuxiang, HAN Fushun. Distribution and transferring of carbon in karst soil system of peak forest depression in humid subtropical region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 70-73.
- [63] 王霖娇, 李瑞, 盛茂银. 典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1367-1378.
WANG Linjiao, LI Rui, SHENG Maoyin. Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1367-1378.
- [64] 任坤, 沈立成, 袁道先, 王晓晓, 徐尚全. 2012—2013 年重庆雪玉洞洞穴系统碳循环特征[J]. *地球科学*, 2016, 41(8): 1424-1434.
REN Kun, SHEN Licheng, YUAN Daoxian, WANG Xiaoxiao, XU Shangquan. Carbon cycle characteristics in karst cave system of Xueyu cave from 2012 to 2013[J]. *Earth Science*, 2016, 41(8): 1424-1434.
- [65] Duc A. Trinh, Quan H. Trinh, Angel Fernández-Cortés, David Matthey, Javier G. Guinea. First assessment on the air CO₂ dynamic in the show caves of tropical karst, Vietnam[J]. *International Journal of Speleology*, 2018, 47(1): 93-112.
- [66] Bergel S J, Carlson P E, Larson T E, Wood C T, Johnson K R. , Banner J L, Breecker D O. Constraining the subsoil carbon source to cave-air CO₂ and speleothem calcite in central Texas[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2017, 217: 112-127.
- [67] 宋贤威, 高扬, 温学发, 郭大立, 于贵瑞, 何念鹏, 张进忠. 中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估及其生态服务功能[J]. *地理学报*, 2016, 71(11): 1926-1938.
SONG Xianwei, GAO Yang, WEN Xuefa, GUO Dali, YU Guirui, HE Nianpeng, ZHANG Jinzhong. Rock-weathering-related carbon sinks and associated ecosystem service functions in the karst critical zone in China[J]. *Acta Geographica sinica*, 2016, 71(11): 1926-1938.
- [68] Covington M D. The importance of advection for CO₂ dynamics in the karst critical zone: An approach from dimensional analysis[J]. *European Journal of Clinical Microbiology*, 2016, 26(6): 431-433.
- [69] 张春来, 黄芬, 蒲俊兵, 曹建华. 中国岩溶碳汇通量估算与人工干预增汇途径[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(4): 42-50.
Zhang C L, Huang F, Pu J B, CAO Jianhua. Estimation of karst carbon sink fluxes and manual intervention to increase carbon sinks in China [J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 40-52.
- [70] Xiaoqun Qin, Zhongcheng Jiang, Liankai Zhang, et al. Chemical weathering and atmospheric CO₂ consumption intensity between carbonate rock and silicate rock in the Pearl River Basin, China[J]. *Modern Environmental Science and Engineering*, 2017, 3(2): 858-863.
- [71] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 杨奇勇. 峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 67-73.
ZENG Faming, WU Zeyan, ZHANG Cheng, YANG Qiyong. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 67-73.
- [72] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 章春华, 段亚锋. 基于遥感影像的桂西北喀斯特区植被碳储量及密度时空分异[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(12): 1545-1553.
ZHANG MingYang, WANG KeLin, LIU HuiYu, ZHANG ChunHua, DUAN YaFeng. Spatio-temporal variation of vegetation carbon storage and density in karst areas of Northwest Guangxi based on remote sensing images[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(12): 1545-1553.
- [73] 钟银星, 周运超, 李祖驹. 印江槽谷型喀斯特地区植被碳储量及固碳潜力研究[J]. *地球与环境*, 2014, 42(1): 82-89.
ZHONG Yinxing, ZHOU Yunchao, LI Zhuju. Research on the Carbon Storage and Potential Carbon Sequestration of Vegetation in the Trough Valley of a Karst Area, Yinjiang[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(1): 82-89.
- [74] 刘九缠, 孙玉川, 沈立成, 唐廉, 刘宁坤, 游贤慧. 石漠化治理对土壤中 CO₂、CH₄ 变化特征及碳汇效应的影响[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 733-741.
LIU Jiuchan, SUN Yuchuan, SHEN Licheng, TANG Lian, LIU Ningkun, YOU Xianhui. Effects of rocky desertification control on CO₂, CH₄ variation and carbon sink in soil[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 733-741.
- [75] 陈伟杰, 熊康宁, 任晓冬, 周文龙. 岩溶地区石漠化综合治理的固碳增汇效应研究: 基于实地监测数据的分析[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 229-238.
CHEN Weijie, XIONG Kangning, REN Xiaodong, ZHOU Wenlong. Study on the carbon-sink effect by treatment to karst rock desertification: An analysis in light of field monitoring data[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 229-238.
- [76] 宋同清, 王克林, 曾馥平, 等. 西南喀斯特植物与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [77] 曾发明. 岩溶石漠化治理对碳汇的影响研究[D]. 武汉: 中国

- 地质大学(武汉), 2018.
- ZENG Faming. The effects of carbon sinks in karst rocky desertification restoration: A case study from Guohua site, Guangxi, P.R. China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [78] 覃小群, 蒙荣国, 莫日生. 土地覆盖对岩溶地下河碳汇的影响: 以广西打狗河流域为例. 中国岩溶, 2011, 30(4): 372-378.
- QIN Xiaoqun, MENG Rongguo, MO Risheng. Influence of land covers on carbon sink of underground river: A case in the Dagouhe Basin in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 372-378.
- [79] 中国地质调查局. 应对气候变化地质调查研究取得重要阶段性成果[N]. 地质调查专报, 2012, 60.
- [80] 张明, 张凤海. 茂兰喀斯特森林下的土壤. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社. 1987.
- [81] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 谢丽萍, 肖德安. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 475-483.
- WANG Shijie, LU Hongmei, ZHOU Yunchao, XIE Dean. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 475-483.
- [82] 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 张伟, 王克林, 陈洪松. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及影响因素[J]. *生态学报*, 2016, 36(6): 1619-1627.
- WU Min, LIU Shujuan, YE Yingying, ZHANG Wei, WANG Kelin, CHEN Hongsong. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1619-1627.
- [83] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 刘运通, 万运帆, 秦晓波, 石锋. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. *中国农业科学*. 2008, 41(3): 734-743.
- JIN Lin, LI Yue, GAO Qingzhu, LIU Yuntong, WAN Yunfan, QIN Xiaobo, SHI Feng. Estimate of Carbon Sequestration Under Cropland Management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734-743.
- [84] 冯婷. 土壤改良对岩溶碳汇影响的试验研究: 以广西平果果化示范区为例[D]. 南宁: 广西师范学院, 1985.
- FENG Ting. Experimental study of soil improvement impact on karst carbon sink: A case study at Guohua Ecological Experimental Area Pingguo Guangxi[D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 1985.
- [85] Jiang Y. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and $\delta^{13}\text{C}$ DIC in Nandong, Southwest China[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, 152: 1-11.
- [86] 罗为群, 蒋忠诚, 邓艳, 吴华英. 石灰土改良试验及其岩溶作用响应研究[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(3): 221-227.
- LUO Weiqun, JIANG Zhongcheng, DENG Yan, WU Huaying. Contrast experimental study on calcareous soil amelioration and karst processes response and karst processes response[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(3): 221-227.
- [87] 严毅萍, 曹建华, 杨慧, 尹辉, 梁毅, 王培. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳碳库及周转时间的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 144-149.
- YAN Yiping, CAO Jianhua, YANG Hui, YIN Hui, LIANG Yi, WANG Pei. The impact of different soil types on soil organic carbon pool and turnover in karst area[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2012, 26(2): 144-149.
- [88] 李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成. 岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2833-2842.
- LI Jianhong, PU Junbing, YUAN Daoxian, LIU Wen, XIAO Qiong, YU Shi, ZHANG Tao, MO Xue, SUN Pingan, PAN Moucheng. Variations of inorganic carbon and its impact factors in surface-layer waters in a groundwater-fed reservoir in karst area, SW China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2833-2842.
- [89] 章程, 肖琼, 苗迎, 郭永丽, 汤庆佳, 郝玉培. 广西桂林漓江典型河段水化学昼夜动态变化及其对岩溶碳循环的影响[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 613-621.
- ZHANG Cheng, XIAO Qiong, MIAO Ying, GUO Yongli, TANG Qingjia, HAO Yupei. Day and Night Aqueous Chemical Changes and Their Impact on Karst Carbon Cycle at Typical Monitoring Sites of the Lijiang River, Guilin, Guangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 613-621.
- [90] 严壮, 汪夏雨, 李为, 等. 岩溶区水生生态系统微藻的生物碳泵效应[J]. *微生物学报*, 2019, 59(6): 1012-1025.
- YAN Zhuang, WANG Xiayu, LI Wei, YU Longjiang. Biological carbon pump effect of microalgae in aquatic ecosystems of karst areas[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(6): 1012-1025.
- [91] Yang M X, Liu Z H, Sun H L, et al. Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pear River: insights from lipid biomarker and geochemical analysis[J]. *Appl Geochem*, 2016, 73: 132-141.
- [92] Yang R, Chen B, Liu H, et al. Carbon sequestration and decreased CO_2 emission caused by terrestrial aquatic photosynthesis: Insights from diel hydrochemical variations in an epikarst spring and two spring-fed ponds in different seasons[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 63(3): 248-260.
- [93] Sun HG, Han JT, Zhang SR, et al. Carbon isotope evidence for transformation of DIC to POC in the lower Xijiang River, SE China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 288-296.
- [94] 杨玉雪, 向鹏, 卢玮琦, 王仕禄. 贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算[J]. *地球与环境*, 2017, 45(1): 66-73.
- YANG Yuxue, XIANG Peng, LU Weiqi, WANG Shilu. The sedimentation rate and burial fluxes of carbon and nitrogen in Wujiangdu reservoir, Guizhou, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 66-73.
- [95] 张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 李瑞, 吴飞红, 李丽. 小球藻对岩溶水体 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 利用效率实验研究[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 81-90.

- ZHANG Tao, LI Jianhong, PU Junbing, LI Rui, WU Feihong, LI Li. Experimental study on the utilization efficiency of *Chlorella* to Ca_2^+ and HCO_3^- in karst water[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 81-90.
- [96] 王培, 胡清菁, 王朋辉, 李斌, 曹建华. 桂林寨底地下河沉水植物群落结构调查及影响因子分析[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(1): 34-39.
- WANG Pei, HU Qingjing, WANG Penghui, LI Bin, CAO Jianhua. Effect of karst geology on the submerged macrophyte community in Zhaidi river, Guilin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(1): 34-39.
- [97] 熊志斌, 王万海, 玉屏, 于爽. 板寨地下河大型水生植物调查及其固碳评价[J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 557-564.
- XIONG Zhibin, WANG Wanhai, YU Ping, YU Shi. Large aquatic plants survey and evaluation of carbon sequestration of the Banzhai underground river[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(4): 557-564.
- [98] Liu Z. Role of carbonic anhydrase as an activator in carbonate rock dissolution and its implication for atmospheric CO_2 Sink[J]. *Acta Geological Sinica*, 2001, 75(3): 347-353.
- [99] 李为, 余龙江, 袁道先, 吴云. 不同岩溶生态系统土壤及其细菌碳酸酐酶的活性分析及生态意义[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 438-443.
- LI Wei, YU Longjiang, YUAN Daoxian, WU Yun. Researches on activity of carbonic anhydrase from soil and its bacteria in different Karst ecosystems and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 438-443.
- [100] 余龙江, 吴云, 李为, 曾宪东, 付春华. 微生物碳酸酐酶对石灰岩的溶蚀驱动作用研究[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(3): 59-62.
- YU Longjiang, WU Yun, LI Wei, ZENG Xiandong, FU Chunhua. Study on the driving effects on limestone corrosion by microbial carbonic anhydrase[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(3): 59-62.
- [101] 李强, 何媛媛, 曹建华, 梁建宏, 朱敏洁. 植物碳酸酐酶对岩溶作用的影响及其生态效应[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1867-1871.
- LI Qiang, HE Yuanyuan, CAO Jianhua, LIANG Jianhong, ZHU Minjie. The plant carbonic anhydrase at karst area and its ecological effects[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12): 1867-1871.
- [102] WANG Chenwei, LI Wei, SHEN Taiming, CHENG Weili, YU Longjiang. Influence of soil bacteria and carbonic anhydrase on karstification intensity and regulatory factors in a typical karst area[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 17-24.

Research progress and prospect of carbon sink in karst region of China

JIANG Zhongcheng^{1,2,3}, ZHANG Cheng^{1,2}, LUO Weiqun^{1,3}, XIAO Qiong^{1,2}, WU Zeyan^{1,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, MNR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract In the 1990s, karst scientists in China took the lead in the study of karst processes and carbon cycle. Based on systematically summarizing research progresses of the carbon cycle and carbon sink in the karst regions, this paper illustrates the principle of the karst carbon sink, puts forward the six kinds of carbon cycle models on the base of the earth system science idea, reveals the stability of karst carbon sink and answers the question of some geological scholars about karst carbon sink, and proposes a new idea to explore carbon sink potential of karst regions from the carbon cycle angle among earth atmosphere, biosphere, hydrosphere and lithosphere. Based on the review of research progresses on carbon sink in the karst regions, the carbon sink potential and shortage of the artificial intervention measure on the comprehensive treatment of rocky desertification, improvement of karst soil, carbon sequestration of aquatic plants and accelerating of karst processes have been analyzed. In the last of the paper, the development direction on investigation, researches and monitoring of carbon sink and technological innovation in the karst basins are given, meanwhile, the working idea for test and demonstration of carbon sequestration and carbon sink increase in karst basin are proposed.

Key words carbon cycle, carbon dioxide sink, karst basin, research progress, China

(编辑 张玲)