

钟亮, 张春来, 胡芬, 等. 基于 Web of Science 的岩溶碳循环及碳汇效应研究动态分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 766-779, 809.

DOI: 10.11932/karst20240403

基于 Web of Science 的岩溶碳循环及碳汇效应研究动态分析

钟亮^{1,2}, 张春来^{1,2}, 胡芬³, 曹建华^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;

3. 江西省地质调查勘查院地质环境监测所(江西省煤田地质勘察研究院), 江西 南昌 330001)

摘要: 为了解岩溶碳循环及碳汇效应研究热点和发展方向, 基于 Web of Science 核心合集引文索引数据库, 对 1997 年 1 月 1 日—2023 年 6 月 30 日间的 573 篇文献进行了文献计量学引文分析。利用 CiteSpace 软件对关键词频率、国家(地区)和机构分布、作者影响、研究热点、共被引文献以及主题演变进行了分析。结果表明, 以刘再华为核心的研究团队继承和发扬了袁道先提出的岩溶作用参与全球碳循环并具有碳汇效应的观点, 并提出了偶联碳酸盐岩风化碳汇模型, 极大推动了岩溶碳汇的研究。关键词聚类的时间线图和关键词时区图清楚地展现了该领域的发展动态, 可认为岩溶碳循环及碳汇效应领域经历 3 个发展阶段: 1) 1997—2006 年的起步阶段, 粗略估算了全球碳酸盐岩风化回收大气 CO₂ 的量为 0.110~0.608 Gt C·a⁻¹, 占全球碳遗漏的 15%~30%; 2) 2007—2014 年的碳酸盐岩化学风化研究快速发展阶段, 主要关注不同流域在外源酸、径流条件及植被覆盖对碳酸盐岩风化的影响; 3) 2015 年之后以大气-生物-土壤-水-基岩为系统的岩溶关键带理论指导下的碳循环及碳汇效应研究新阶段, 考虑了水生生物光合作用、气候变化及土地利用变化等条件下岩溶碳循环及碳汇效应。

关键词: 岩溶碳循环; 岩溶碳汇; 文献计量学; 研究动态

创新点: 基于文献计量学方法综述了碳循环及碳汇效应领域主题演变、学科发展动态, 主要观点及理论运用, 提出了未来应关注的热点研究方向。

中图分类号: P641.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0766-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

CO₂ 浓度上升是全球气候变暖的重要因素之一^[1]。自第一次工业革命初期以来, 大气 CO₂ 分压由大约 277.0×10⁻⁶ 快速上升至 2022 年的 417.2×10⁻⁶^[2]。研究表明, 燃烧化石燃料排放的 CO₂ 大约有一半留

在大气中, 另一半被海洋和陆地生物圈吸收^[3], 然而如何准确估算并平衡全球碳收支是当今面临的一大难题。其中陆地碳汇的量级和分配状况是争论的焦点。1997 年袁道先提出了岩溶作用参与全球碳循环并具有碳汇效应的观点^[4]。随后, 越来越多的研究证实岩溶碳汇是陆地碳汇的重要组成部分^[5-9]。岩溶作

资助项目: 岩溶地质科普基地信息化建设与创新示范(桂科 AD21196005); 中国地质局地质调查项目(DD20230547); 自然资源科技战略研究项目(2023-ZL-23)

第一作者简介: 钟亮(1990—), 男, 助理研究员, 主要从事岩溶水文地质科研工作。E-mail: zhongliang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 张春来(1984—), 男, 副研究员, 主要从事岩溶生态地质科研工作。E-mail: zhangchunlai@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-01-31

用是指水对可溶岩的化学溶蚀作用及由于 CO₂ 脱气形成的碳酸钙沉积作用,可宏观上分为表层岩溶作用和深部岩溶作用^[10]。全球岩溶分布面积约 2 200 万 km²,占陆地面积的 15%^[11],具有巨大的碳汇潜力。可见准确理解认识岩溶与碳循环的关系及其碳汇效应对缓解碳中和压力,对助力我国实现“双碳”目标具有重大意义。

随着岩溶碳循环和碳汇效应成为研究热点,有不少有关岩溶碳循环及碳汇效应的研究综述^[10,12-17],但多以传统文献阅读归纳总结为主。文献计量学分析是全面认识特定学科领域研究进展的一种重要工具,它可以通过一系列的数学和统计工具衡量出版物之间的相互关系和影响,现已运用于许多研究领域^[18]。尽管最近几年有学者基于文献计量学的方法分析岩溶学研究热点,但由于选题不够聚焦或时间范围仅为某一年度^[19-21],不能很好地深入分析某一领域前沿热点和发展动态。鉴于此,本文对岩溶碳循环及碳汇效应领域近 27 年(1997 年 1 月 1 日—2023 年 6 月 30 日)收录于 web of Science 核心合集数据库中的文献进行可视化分析,以期追踪该领域研究热点和发展动态,从而为岩溶碳循环和碳汇效应领域的未来研究提供一定的参考。

1 数据和方法

1.1 检索策略

基于对岩溶碳循环及碳汇效应范畴的理解,力求收集到既全面又精准的数据,本文在 Web of Science 核心合集的 SCI-Expanded 和 SSCI 数据库中采用如下检索策略:1)必须满足与岩溶相关;2)与碳循环和碳汇相关。检索规则初步设定为: (“karst” or “karstic” or “karstification” or “epikarst” or “stalagmite” or “travertine” or “carbonate* weathering” or “weathering of carbonate”) and (“carbon cyc*” or “carbon sink” or “carbon sequestration” or “CO₂ fixation” or “CO₂ uptake” or “CO₂ consum*” or “carbon dioxide fixation” or “carbon dioxide uptake” or “carbon dioxide consum*”),其中*为通配符。检索文献类别为 Article, Review, Proceeding Paper,检索时间范围为 1997 年 1 月 1 日至 2023 年 6 月 30 日,共计检索文献 804 篇。排除一些不相关词汇 P. Karst, 优

化检索后提取到 684 篇文献,经人工筛选和 CiteSpace 去重分析后,得到 573 篇独立文献。

1.2 分析内容

数据导入 CiteSpace 可视化分析软件(6.2.4 高级版)后,参数设置为节点类型选择关键字,切片长度 1 年,每个切片选择前 50 个关键词,裁剪模式选择寻径网络算法。基于 573 篇文献记录的数据,从宏观角度上对该领域发文作者、发文机构、国家、关键词、引文共被引、作者共被引进行了分析,并对岩溶碳循环及碳汇效应领域的研究进行了展望。本研究基于国际上主流数据库对碳循环及碳汇领域研究特点进行可视化分析,以期更好地了解 and 追踪该领域的研究动态和热点。

2 结果与讨论

2.1 文献时间分布

1997 年袁道先提出了岩溶作用参与碳循环且具有碳汇效应的科学论断,2007 年之前发文量较少,且处于起步阶段,并未产生较大影响,2007—2014 年之间发文量缓慢增加,影响力逐步上升,2015 年之后发文量快速增加(图 1),说明岩溶碳循环及碳汇效应得到越来越多的关注。

2.2 关键词可视化

2.2.1 关键词共现分析

根据图 2 显示的关键词共现图谱,发现“atmospheric CO₂, CO₂, carbon dioxide”(123 次),“CO₂ consumption”(107 次),“chemical weathering, carbonate weathering”(93 次),“dissolved inorganic carbon”(61 次),“basin”(59 次),“water”(51 次)等词出现频次较高,说明岩溶碳循环及碳汇的研究内容为大气、水体、岩石之间的化学风化作用,即岩溶作用通过消耗大气 CO₂ 转化为水体无机碳的地球化学过程,并且研究多以流域尺度开展通量计算。“climate, climate change, climate-change”出现 76 次,说明该领域与气候变化研究相关。“soil organic carbon, organic carbon”(49 次),“soil CO₂, soil”(41 次)等词也具有较高的频次,表明岩溶区土壤碳循环与碳汇研究热度较高。另外,“China, Southwest

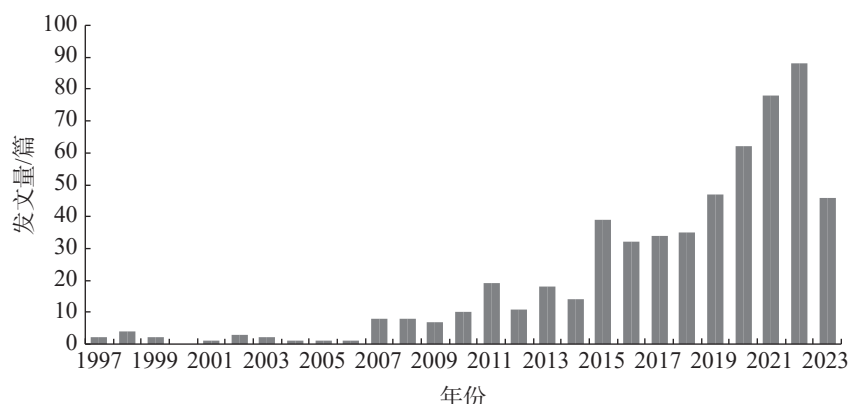


图1 岩溶碳循环及碳汇效应年度发文量

Fig. 1 Numbers of publications on karst carbon cycle and carbon sink effect published annually

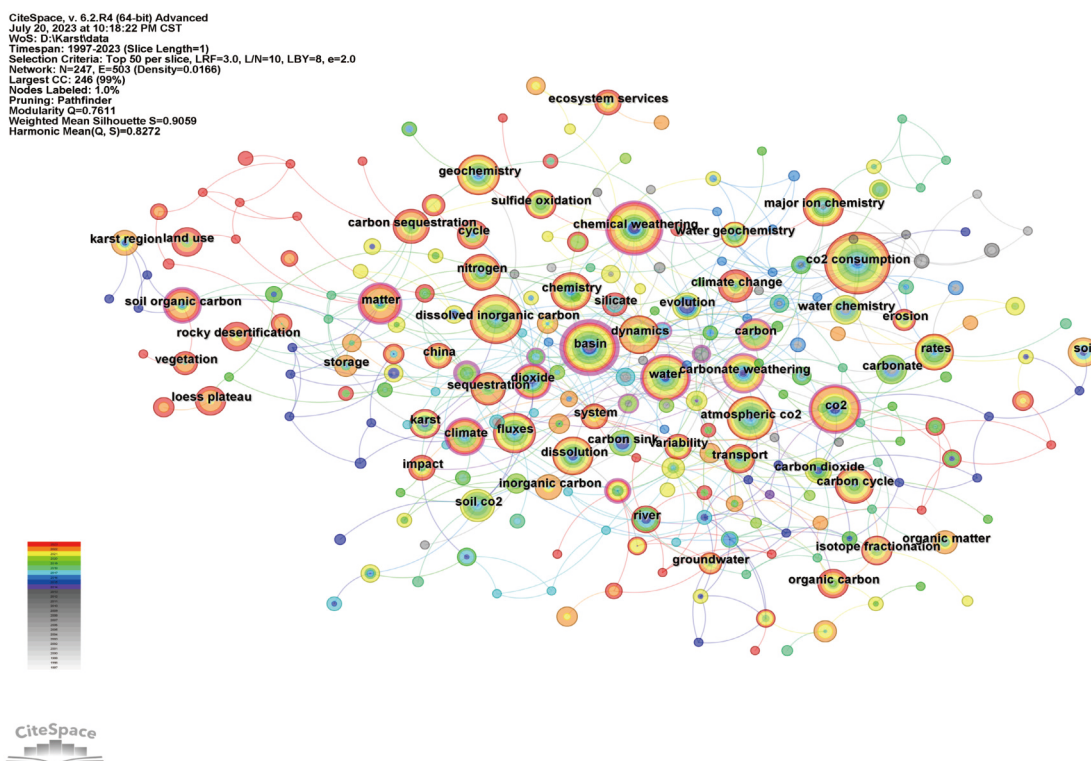


图2 岩溶碳循环及碳汇效应关键词共现网络图谱

Fig. 2 Network map of the keywords co-occurrence of karst carbon cycle and carbon sink effect

China, Guizhou, Xijiang river”等研究区域位置出现47次,说明岩溶碳循环及碳汇效应的研究区主要分布在中国西南地区。

2.2.2 关键词突现

“突现词”是指在一段时间内被频繁引用的关键词,从而表明研究前沿领域。通过对关键词按年份进行学科前沿分析(图3)可以发现,“evolution”一词自1997年出现后,在此后的1998—2016年持续产生影响,突现强度3.04。随后“fluvial geochemi-

stry”“silicate”“basin”“chemistry chemical weathering”“rates”“dissolution”“dioxide”“climate”“carbon sink”、“river”等词在2007年以后一段时间,显示较强的突现强度,说明该段时间对不同流域及河流化学风化产生碳汇的研究较为热门。紧接着“cave”“soil CO₂”“southwest China”“isotopic composition”“sulfide oxidation”“Tibetan plateau”“ $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ”等词在2015年之后突现,说明岩溶碳循环过程及碳来源对碳汇效应的影响得到关注,各种同位素示踪方法得到应用。2021年之后“rocky

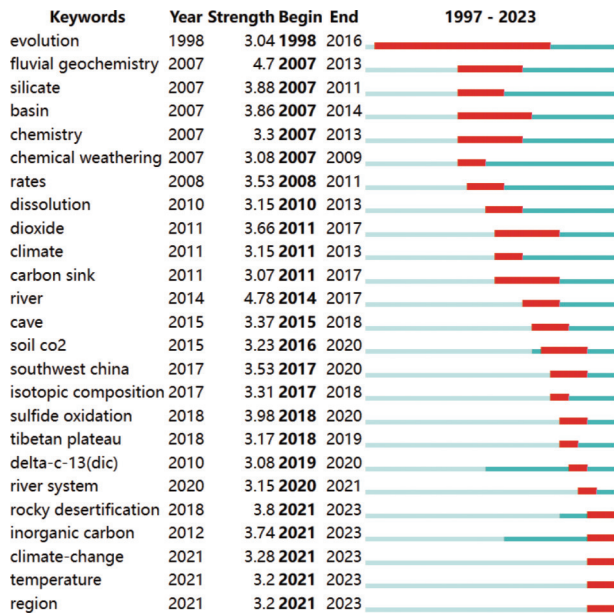


图 3 关键词突现结果(前 25 位)

Fig. 3 Top 25 keywords with the strongest citation bursts

desertification” “inorganic carbon” “climate-change” “temperature” “region” 突现,说明此时从人为干预、气候变化、温度上升等宏观角度研究岩溶碳循环及碳汇效应成为一股新的研究趋势。

2.2.3 关键词聚类

图 4 为对前 100 关键词进行聚类得到的关键词

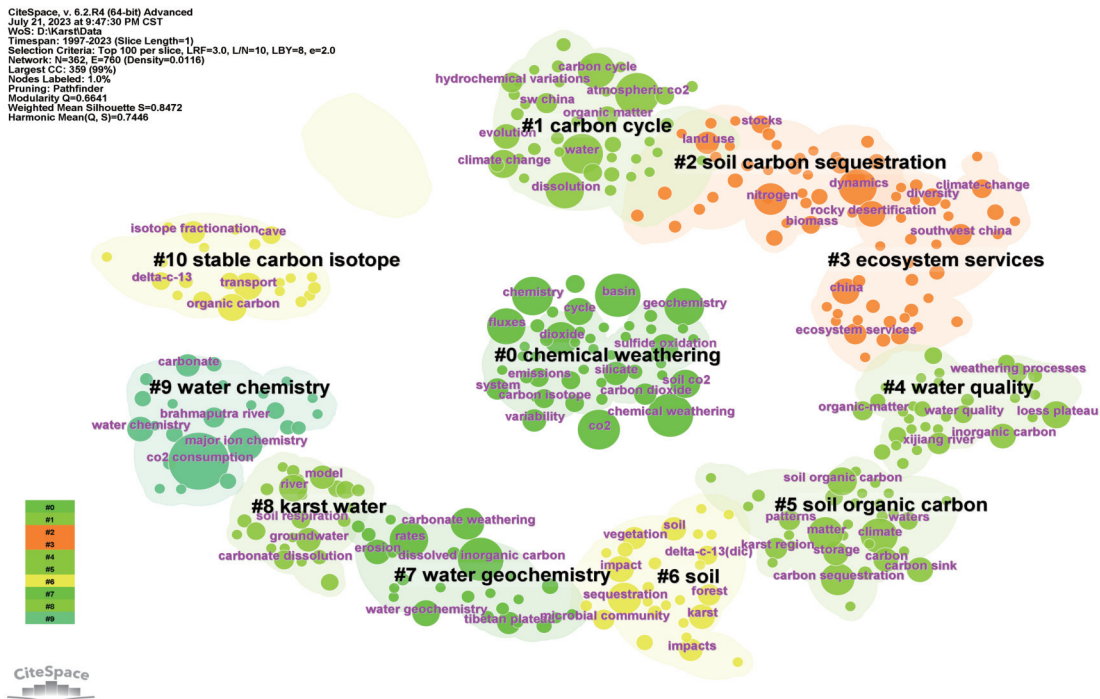


图 4 前 100 关键词聚类图

Fig. 4 Clustergram of top 100 keywords

聚类图,图中形成 11 个聚类。#0 代表化学风化产生的碳循环及碳汇效应; #1, #4, #7, #8, #9 代表大气 CO₂ 进入岩溶流域水体,通过岩溶作用产生的碳循环及碳汇效应过程,同时也关注水体水化学及水质的变化; #2, #5, #6 代表岩溶土壤有机质转化,微生物作用,以及植被变化下的土壤碳循环及碳汇效应过程; #3 代表岩溶区生态效应服务功能下,生态系统碳循环及碳汇效应过程; #10 代表碳同位素技术方法在该领域的运用。聚类分析结果显示,岩溶区碳循环及碳汇效应与大气圈、水圈、岩石圈、土壤圈联系紧密,是一个不可分割的有机组合,需要科学家们从地球系统科学的视角来思考问题。

2.3 文献国家(地区)、机构及作者分析

2.3.1 国家(地区)分布

图 5 为岩溶碳循环与碳汇领域至少发表 8 篇文章的国家网络共现图,发文前 7 位的国家分别是中国(388 篇)、美国(101 篇)、德国(39 篇)、英国(27 篇)、法国(22 篇)、西班牙(22 篇)、印度(22 篇),可见中国在该领域占据主导地位。从地理上看,以上国家是世界上岩溶分布较广泛的地方,在该领域的研究具有较强的地域优势。中国的中介中心性最高(0.58),其次是美国(0.56),说明中国和美国在该

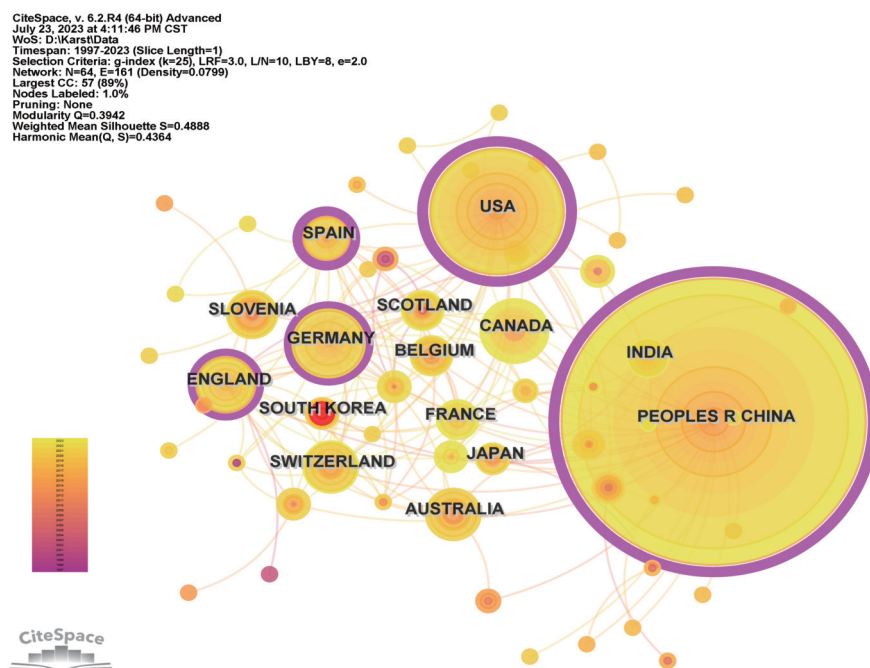


图5 国家(地区)合作网络共现图

Fig. 5 Co-occurrence diagram of network for national (regional) cooperation

领域合作网络中具有重要作用。

2.3.2 机构分布

除了国家地区,同样可以从科研机构方面对合

作网络进行分析,帮助我们了解该领域主要研究机构。中国科学院、中国地质大学、中国地质科学院发文量排名前三,西南大学、贵州师范大学紧追其后。从图6合作机构合作网络图中可以看出,中国科学

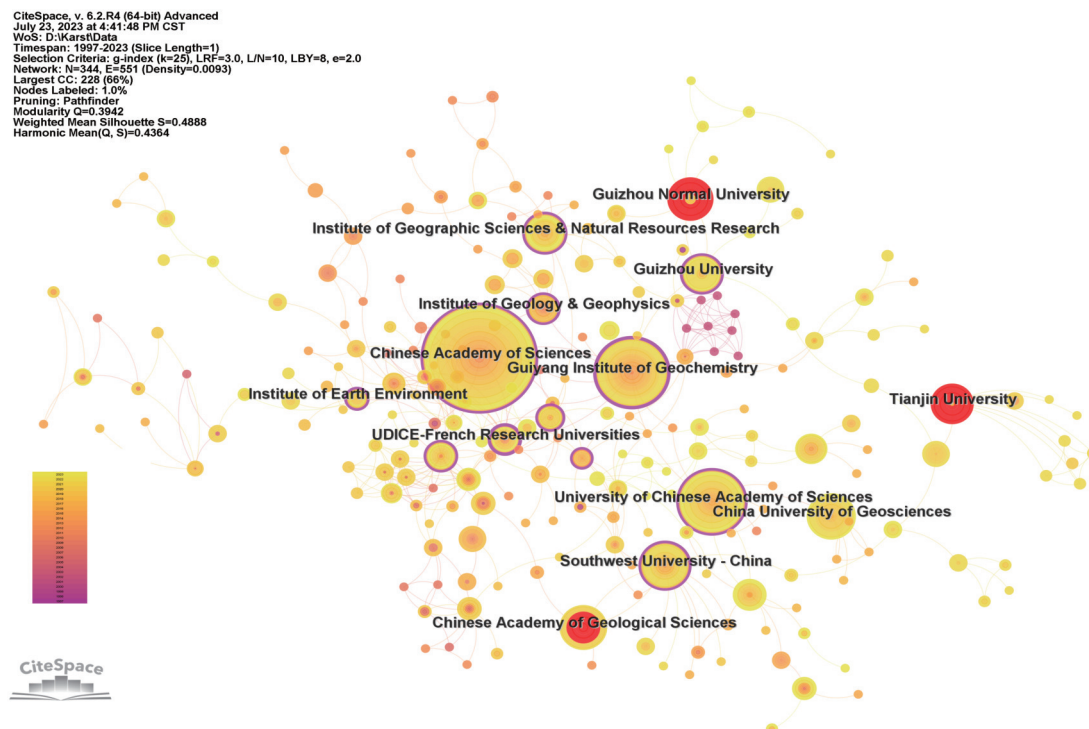


图6 主要机构共现网络图

Fig. 6 Co-occurrence diagram of network for main institution cooperation

院地球化学研究所、西南大学、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院大学等机构中介中心性较高,分别为 0.30、0.15、0.13、0.11,表明以上四个机构在机构合作网络中具有重要作用。与其他机构相比,贵州师范大学(突现值 4.47,持续时间为 2021—2023 年)、中国地质科学院(突现值 3.64,持续时间 2017—2020 年)、天津大学(突现值 3.36,持续时间 2020—2023 年)显示较强突现强度,表明以上机构近年来在该领域取得较多的突破性研究成果。

2.3.3 作者及团队影响力

从图 7 作者共现网络图可以发现,岩溶碳循环及碳汇效应领域主要由刘再华、袁道先、曹建华、李思亮、钟君、徐志方等带领的研究团队主导,分别代表中国科学院地球化学研究所、中国地质科学院岩溶地质研究所、天津大学、中国科学院地球物理研究所团队。刘再华研究团队发展和创新了袁道先早期提出的理论,提出了水生生物光合作用促进岩溶碳汇的研究,开辟了岩溶碳汇研究的新方向,成为近些年热点研究方向之一。通过深入分析,中国地质科学院岩溶地质研究所团队与国内外机构合作较为紧密,与西南大学、佛罗里达大学、西肯塔基大学保持较为紧密的合作关系。曹建华、陈波的中介中心性较高,说明二人在该领域具有很好的“桥梁”和

“中介”作用。

从团队发文的时间分布可以看出,以刘再华为代表的团队持续发文量最多,是该领域核心研究团队,形成了以碳-水-钙-生物为主线的“岩溶作用动力学及其相关的碳水钙循环和全球变化”的理论和应用研究体系^[6-7,22-24]。以袁道先为代表的研究团队最早提出了岩溶作用参与碳循环并具有碳汇效应的观点,该团队目前主要关注流域尺度碳汇估算^[25]、河流溶解无机碳昼夜变化规律^[26-27]及岩溶溪流、水库水汽界面 CO₂ 通量研究^[28-29]。天津大学李思亮团队主要从事流域碳、氮水文和生物地球化学循环及风化过程^[30-31]。中国科学院地质与地球物理研究所徐志芳团队在西江流域开展了系列大陆化学风化与碳循环研究工作^[32-33]。

2.4 被引文献分析

2.4.1 被引文献网络分析

图 8 显示了岩溶碳循环及碳汇效应领域文献共被引关系。引用次数排名前十的参考文献中,来自中国的有 6 篇,美国 3 篇,法国 1 篇。被引次数前十的文献中刘再华贡献了 4 篇,说明其在岩溶碳循环及碳汇效应领域具有重要影响力,其发表于 2010 年、2011 年、2015 年、2018 年的四篇文献分别被本文分

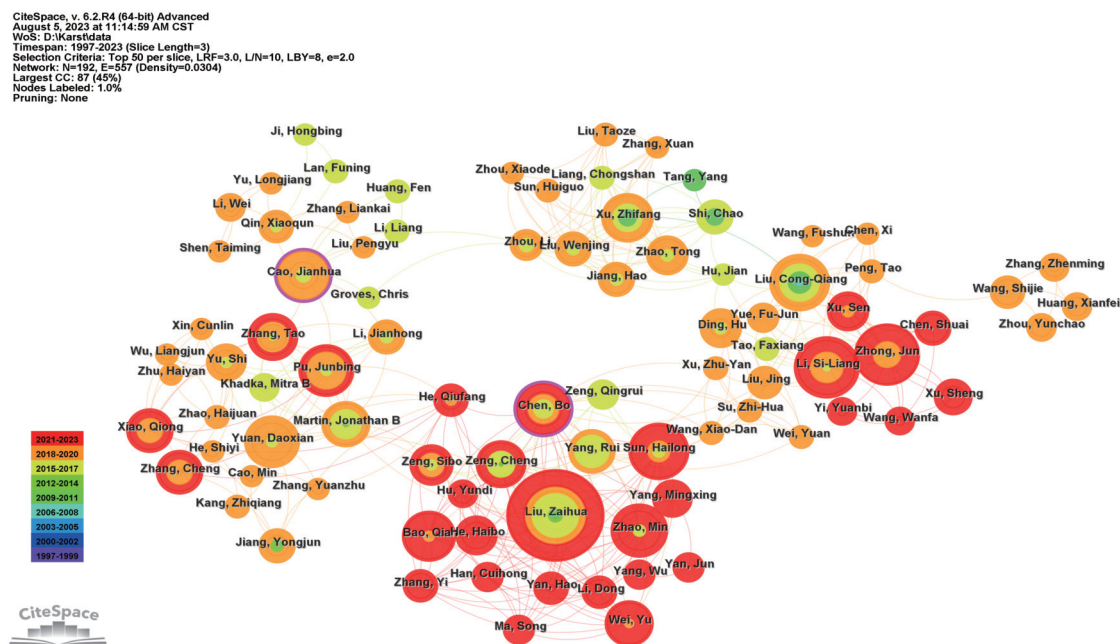


图 7 作者合作网络共现图

Fig. 7 Co-occurrence diagram of network for major author cooperation

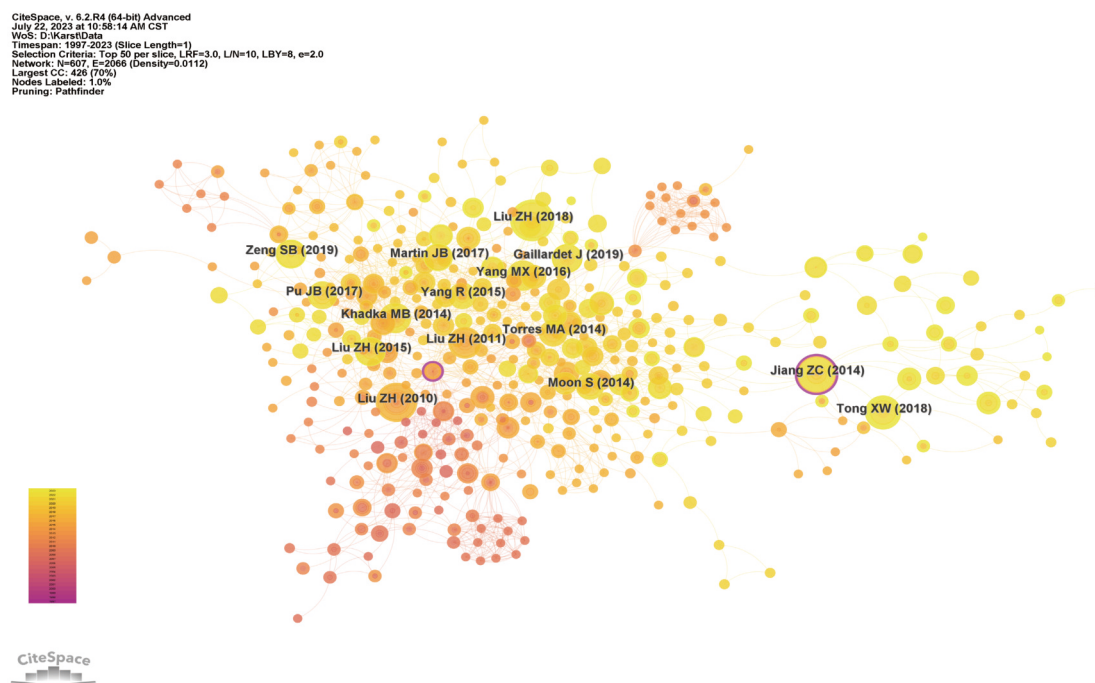


图 8 岩溶碳循环及碳汇领域高被引文献共被引网络图

Fig. 8 Co-citation network of highly cited publications in the field of karst carbon cycle and carbon sink effect

析的 573 篇文献引用 43 次, 31 次, 30 次, 48 次。Liu 等^[6]通过理论计算和现场监测表明, 碳酸盐岩溶解、全球水循环以及海洋和陆地水生生物对溶解无机碳的光合吸收是一种重要的碳汇, 其碳汇能力为 $0.8242 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 是陆地生态系统碳汇 29.4%, 扣除返回大气中的那部分, 其净碳汇能力为 $0.7052 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Liu 等^[7]考虑到碳酸盐岩的快速动力学溶解和少量碳酸盐岩矿物控制硅酸盐岩流域无机碳的重要作用, 加之水生光合作用对风化相关无机碳的吸收和由此产生的一些有机碳的埋藏, 碳酸盐岩风化造成的碳汇在此之前可能被低估了 3 倍。Liu 等^[22]基于岩石风化研究最新进展, 并综合地表水生生态系统碳泵效应研究成果, 发现陆地上基于 H_2O -碳酸盐- CO_2 -水生光合生物相互作用的碳酸盐岩风化碳汇达 $0.5 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 而且在气候变暖和土地利用变化的影响下呈现显著的增加趋势。Liu 等^[23]将碳酸盐岩风化与水生光合作用相结合称之为“偶联碳酸盐岩风化”, 并认为“偶联碳酸盐岩风化”通过水循环和水生碳通量的变化与气候和土地利用变化相关。Jiang 等^[34]的一篇文章“Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration”被引用排名第三, 引用次数 41 次, 说明中国西南岩溶石漠化的影响, 成因和生态恢复对岩溶碳循环及碳汇领域的研究具有

重要参考作用。Tong 等^[35]运用卫星时间序列显示的叶面指数和生物量碳增加, 与生态系统模型模拟的在没有人为影响的情况下发现负面趋势形成鲜明对比, 说明生态工程对中国喀斯特植被生长和碳储量的促进作用(被引 34 次)。Mitra B. Khadka 等^[36]通过研究佛罗里达州中北部圣达菲河上下游流域发现, 受硅酸盐限制的上游地区河流向大气 CO_2 脱气明显高于下游碳酸盐岩区(被引 31 次)。Seulgi Moon 等^[37]发表的基于 GEMS/Water 和 HYBAM 全球数据集估算了流域—全球尺度硅酸盐岩风化速率, 被引用 28 次, 该文献为硅酸盐岩碳汇与碳酸盐岩碳汇对比研究提供了重要价值。Jerome Gaillardet 等^[38]基于全球碳酸盐岩区河流和泉数据, 运用 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子作为指示剂, 评估全球不同气候条件下 (-15°C 到 30°C), 碳酸盐岩风化速率受陆地温度的关系, 认为碳酸盐岩最佳风化溶解速率在 $10\sim 15^\circ\text{C}$ (被引 28 次)。Martin Jonathan B^[39]综述了碳酸盐岩矿物分别在碳酸、硝酸、硫酸作用下溶解, 及其充当碳汇、碳源的角色, 分析其对全球碳循环的影响(被引 28 次)。

2.4.2 被引文献突现分析

图 9 所示显示了岩溶碳循环及碳汇效应领域

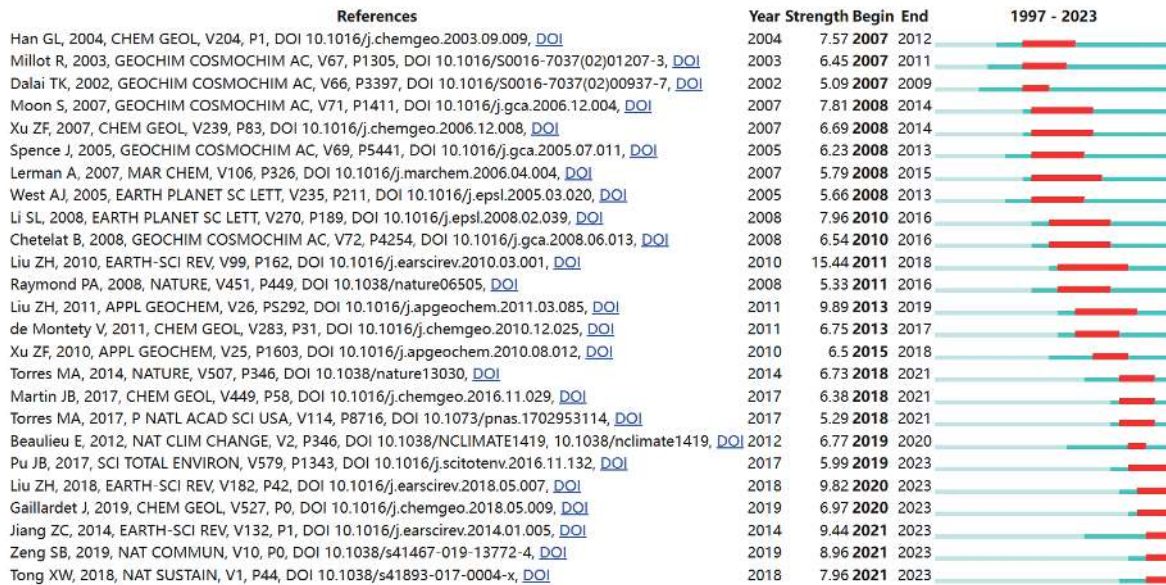


图 9 岩溶碳循环及碳汇效应领域被引文献突现结果(前 25 位)

Fig. 9 Top 25 references with the strongest citation bursts in the field of karst carbon cycle and carbon sink effect

1997—2023 年间引用突现最强的 25 篇文献。1997—2006 年间未出现突现文献,说明该阶段岩溶碳循环及碳汇还未得到充分关注。自 2007 年以来大量有关流域化学风化的文献涌现并产生重要影响,涉及流域包括乌江流域^[40]、加拿大麦肯齐流域^[41]、印度亚穆纳河流域^[42]、西江流域^[32-33]、红河流域^[43]、加拿大科迪勒拉地区等^[44]。以上文献主要关注碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化、蒸发盐岩风化对流域水化学组分来源的分析以及控制风化的主要因素。前文提到的刘再华 4 篇高被引文章有 3 篇文章表现超强的突现值,且占据榜单文献突现强度前 3 名,分别为发表于 2010 年的文章^[6](突现强度 15.44,持续时间 2011—2018 年),2011 年文章^[7](突现强度 9.89,持续时间 2013—2019 年)以及 2018 年文章^[23](突现强度 9.82,持续时间 2020—2023 年)。前文提到的蒋忠诚发表于 2014 年的文章^[34],突现强度排名第 4,突现强度 9.44,持续时间 2021—2023,说明该文章在后期得到广泛关注。曾思博等^[24]发表的“Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes”突现强度 8.96,排名第 5,持续时间 2021—2023 年,该文基于气候因子和人类土地利用影响的碳酸盐岩溶蚀平衡模型,评估了过去 50 年来全球碳酸盐岩风化碳汇强度的纬度分布。李思亮等^[30]发表的“Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$: Examples from Southwest China”突现强度 7.96,与前文童晓伟 2018

年^[35]一文并列第 6 名,持续时间 2010—2016 年,该文利用碳同位素证据和北盘江流域泉水和河流的水化学证明了硫酸也是岩石风化的重要因素。尽管不少突现文献研究地区包含了非岩溶区,但其持续被引用,表明其对岩溶碳循环及碳汇效应研究具有重要参考意义。

2.5 研究主题演变分析

为了解岩溶碳循环及碳汇效应领域主题演变过程,图 10 描绘了关键词聚类形成的时间线图,共有聚类 11 个。纵向上,出现突现强度的关键词(节点中心为红色的圈)主要分布在聚类#0 chemical weathering、聚类#1 carbon cycle、聚类#7 water geochemistry、聚类#8 karst water、聚类#9 water chemistry、聚类#10 stable carbon isotope 这 6 个聚类中,说明以上聚类方向是研究的重点或新技术和方法的出现。其中聚类#4 water quality,聚类#7 water geochemistry,聚类#8 karst water,聚类#9 water chemistry 可合并一个单独的聚类,主要关注岩溶作用对水质及水化学的影响;聚类#2 soil carbon sequestration、聚类#5 soil organic carbon、聚类#6 soil 可合并为一个聚类,主要关注的是土壤碳循环及碳汇问题。聚类#3 ecosystem service 表明生态系统服务,在岩溶碳循环及碳汇效应领域充当重要作用;#10 stable carbon isolable 表示追踪岩溶区岩溶碳循环及碳汇效应来源的技术方法。横向上,我们可以看出聚类#1 carbon cycle 由于其范

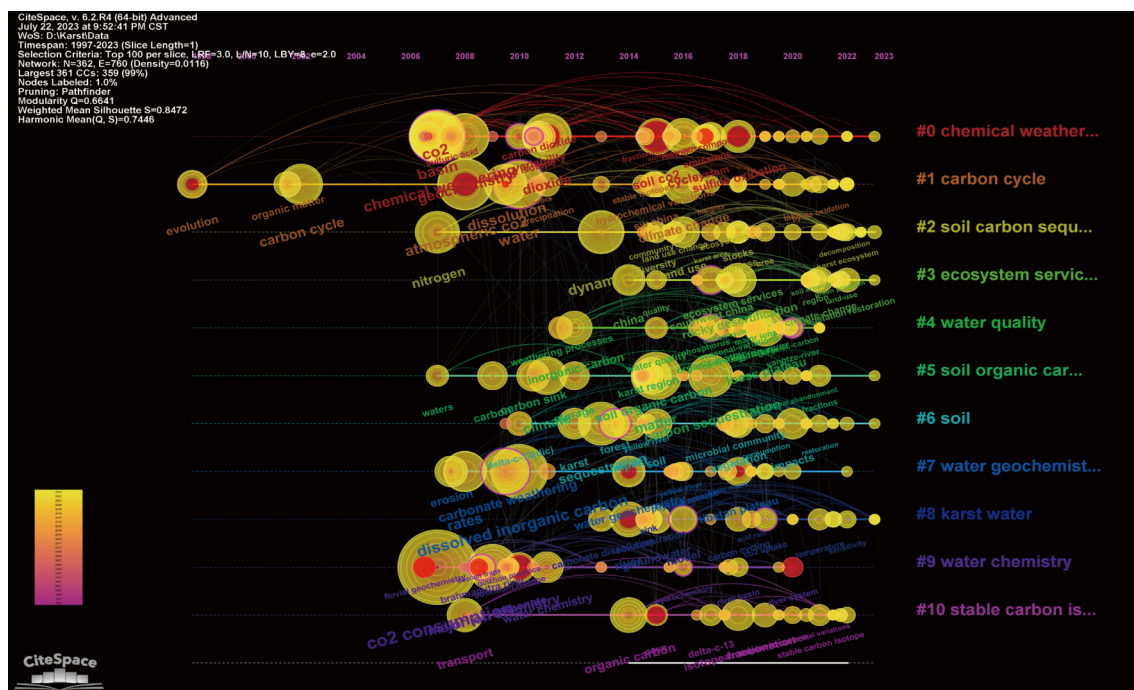


图 10 按年份的研究主题时间线图

Fig. 10 Timeline view of research topics by year

围较大,起步时间最早;聚类#3 ecosystem service 起步时间最晚,说明其可能是未来发展的一个新方向,其余聚类普遍都在 2007 年之后开始出现,具有较一致的发展步调。

关键词时区图能够反映研究演变过程,图 11 展现了岩溶碳循环及碳汇效应领域研究的演变动态。图中带有标签的节点表示出现频次 20 次以上,部分节点为表示演化的趋势,手动设置显示其标签。从图中可以发现,2007 年以前仅出现“evolution”“carbon cycle”“organic matter”,说明该时间段岩溶碳循环与碳汇研究尚未得到广泛关注,处于起步阶段。袁道先主持的国际地学计划 IGCP 379“岩溶作用与碳循环”(1995—1999)的启动标志着碳酸盐岩风化与溶蚀作用全球对比研究的开始。该阶段运用石灰岩溶蚀试片法、水化学法、扩散边界层(Diffusion Boundary Layer, DBL)以及最大潜在溶蚀(Maximum Potential Dissolution, MPD)法对岩溶碳循环进行了全球研究,初步估算全球岩溶作用回收大气 CO_2 量为 $0.11\sim 0.608 \text{ Gt C}\cdot\text{a}^{-1}$, 占全球碳遗漏的 15%~30%^[45-47]。2007—2014 年流域碳酸盐岩化学风化、河流水化学特征及来源成为研究热点,大量与之相关关键词出现,如“ CO_2 consumption”“Chemical weathering”“basin”“atmospheric CO_2 ”“sili-

cate”“geochemistry”“sulfuric acid”“major ion chemistry”“carbonate weathering”“dissolution”“dissolved inorganic carbon”“silicate weathering”“carbon sink”等。该阶段充分考虑了地质成因硫酸,农业生产氮肥的使用,径流条件,以及植被覆盖对碳酸盐岩风化的影响。Li 认为由于硫酸参与碳酸盐岩风化,至少在短时间尺度上,贵州碳酸盐岩风化向大气输出的 CO_2 是净碳源^[30]。Xu 等估算出西江流域碳酸盐岩风化消耗 CO_2 的量是硅酸盐岩的 5.2 倍,此外硫酸参与的碳酸盐岩风化造成的大气 CO_2 释放量为 $0.1\times 10^6 \text{ mol C km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[32-33]。韩国汉江流域的研究表明由于黄铁矿氧化带来的硫酸促进了流域化学风化,南汉江流域消耗的 CO_2 低于北汉江流域^[48]。由于农业氮肥的使用, Perrin 等基于法国加龙河流域研究表明,碳酸盐岩自然风化吸收的大气 CO_2 在法国和全球范围内分别减少了 $0.22\sim 0.53 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $12\sim 29 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[49]。此外, F. Brunet 等基于溶解无机碳中的 C^{13} 同位素,解析了碳酸盐岩风化酸的来源,流域上游泉水出露处主要受自然风化作用,下游则是农业氮肥硝酸来源和自然风化共同作用的结果^[50]。径流强度的差异同样影响碳酸盐岩风化, Yan 等研究表明,贵州后寨河流域雨季碳酸盐风化吸收的 CO_2 是旱季的 2.4 倍^[51]。植被覆盖影响土壤 CO_2 含量进而

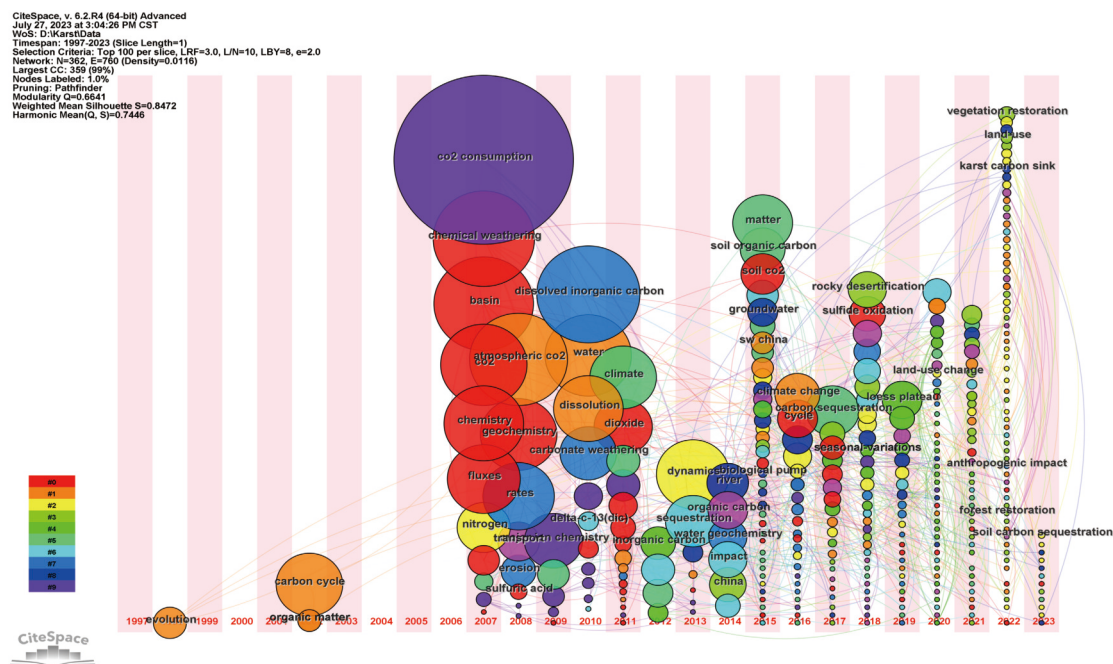


图 11 岩溶碳循环及碳汇效应领域关键词时区图

Fig. 11 Time zone map of keywords about karst cycle and karst carbon sink effect

影响碳酸盐岩风化速率, Damien 等发现西欧侏罗山脉流域落叶植被覆盖下的碳酸盐风化速率比针叶树覆盖下的高 20%~30%, 至少在短时间尺度上消耗大气 CO_2 $0.3 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ [52]。对于碳酸盐岩溶蚀这一过程, Curl 认为由于溶蚀产生的重碳酸根离子进入地下可能形成石笋, 汇入海洋形成贝壳和珊瑚礁, CO_2 重新返回大气, 因而碳酸盐岩的风化只是碳的迁移并不产生净碳汇 [53]。2015 年以后, 一大批关键词涌现, 如 “matter” “soil organic carbon” “soil CO_2 ” “groundwater” “community” “model” “cycle” “unsaturated zone” “ $\delta^{13}\text{C}$ ” “photosynthesis” “ecosystem services” “rocky desertification” “biomass” “aquifer” 等。以上关键词涵盖大气圈、生物圈、土壤圈、水圈、岩石圈, 说明此时岩溶区碳循环及碳汇效应的研究已不仅仅是关注碳酸盐岩的化学风化, 已经渗透到与岩溶接触的各个圈层, 继承和发扬了袁道先 1988 年提出的岩溶环境系统概念 [54], 1997 年提出的岩溶动力系统理论 [55] 以及 2015 年提出的岩溶关键带理论 [56]。

此外, “biological pump” (2015 年)、“land use change”、“climate change” (2016 年)、“system” (2017 年)、“ecosystem services”、“rocky desertification” (2018 年)、“impacts” (2020 年)、

“karst ecosystem” (2022) 等关键词的出现, 说明生物碳泵效应、土地利用方式的改变、气候变化、生态系统服务、石漠化、岩溶生态系统影响岩溶碳循环及碳汇效应, 需要从各方面系统考虑岩溶碳循环及碳汇效应。刘再华提出的偶联碳酸盐岩风化理论回应了 Curl 认为碳酸盐岩风化只是碳转移而非碳汇的论断, 并认为碳酸盐岩风化产生碳汇被低估了 [22-23]。大量的水生生物可以直接利用水中的重碳酸根离子作为光合作用的碳源, 包括沉水植物、藻类、光合细菌等 [22,57-58]。Sun 等估算了漓江流域偶联碳酸盐岩风化产生的碳汇为 $14.41 \text{ tC} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中生物碳泵效应产生的碳汇占比 15.54% [26], 但地表水-地下水交互强的地区, 由于河流有机质输入, 微生物的异氧呼吸以及河流中动物对水生生物的消耗表现为对岩溶碳汇的负反馈 [5]。Yan 等基于自然岩溶水体中原位中尺度微藻培养实验估算了会仙湿地岩溶水生生态系统中蓝藻和碳酸酐酶光合固碳能力, 无机碳向相对稳定有机碳的年平均转化为 $4207.5 \text{ tC} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中岩溶地下河中约 28.7% 的重碳酸根离子通过微藻光合作用固定为有机碳 [59]。Shen 等通过流动溶蚀试验证明了碳酸酐酶能够促进 CO_2 的吸收和转化, 进而促进碳酸盐岩溶蚀作用, 并在全球碳酸盐溶蚀碳汇中的贡献为 $0.567 \times 10^8 \sim 1.983 \times 10^8 \text{ tC} \cdot \text{a}^{-1}$ [60]。Wang 等基于野

外土柱溶解试验得出,岩溶垭口处土壤岩溶碳汇最强,斜坡处次之,洼地处最弱,碳酸酐酶产生微生物丰度的比例在垭口处也最多^[61]。土地利用方式的改变通过改变土壤 CO₂ 含量,径流条件以及农业生产带来的外源酸影响碳酸盐岩风化过程。在可预见的未来,大气二氧化碳溶度和气温的升高,微生物活动增强、土壤 CO₂ 含量增加,通过溶解无机碳施肥效应促进生物碳泵效应以及径流增强,未来碳酸盐风化碳汇强度将进一步增加^[62]。

3 结论及展望

本研究系统性地对岩溶碳循环及碳汇效应领域 1997 年 1 月 1 日—2023 年 6 月 30 日收录于 SCI-Expanded 和 SSCI 数据库的论文进行分析。从发文数量上看,共收集到 573 篇论文,2007 年之前发文较少,2007—2014 年缓慢增加,2015 年之后显著增加。通过对国家和地区发文分析发现岩溶碳循环及碳汇效应研究具有鲜明的地域特征,主要由中国主导,美国、欧洲等地区跟进。关键词聚类分析发现,可合并为 5 个主要聚类:(1)碳酸盐岩化学风化碳循环及碳汇;(2)岩溶水体中的碳循环及水化学特征;(3)岩溶区土壤碳循环及碳汇;(4)生态系统服务对岩溶碳循环碳汇影响;(5)稳定碳同位素技术方法。作者和参考文献分析发现,刘再华继承和发展了袁道先早期理论,提出了水生生物光合作用促进岩溶碳汇的研究理论,成为近些年热点方向之一。关键词聚类的时间线图和关键词时区图清楚的展现了该领域的发展动态,可认为岩溶碳循环及碳汇效应领域经历 3 个发展阶段:1)1997—2006 年的起步阶段,粗略估算了全球碳酸盐岩风化回收大气 CO₂ 的量为 0.110~0.608 Gt C·a⁻¹,占全球碳遗漏的 15%~30%;2)2007—2014 年的碳酸盐岩化学风化研究快速发展阶段,主要关注不同流域在外源酸、径流条件及植被覆盖对碳酸盐岩风化的影响;3)2015 年之后以大气-生物-土壤-水-基岩为系统的岩溶关键带理论指导下的碳循环及碳汇效应研究新阶段,考虑了水生生物光合作用、气候变化及土地利用变化等条件下岩溶碳循环及碳汇效应。

总体上,岩溶碳循环及碳汇效应研究正在不断发展和走向应用。2021 年,岩溶碳汇正式纳入《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》《2030 年前碳达峰行动方案》等国家文件,说明岩溶增汇已成为我国实现“双碳”目标重要途径。未来,应以地球系统科学理论指导下的地球关键带碳循环及碳汇研究为主要方向。微观上,聚焦关注土壤中碳酸酐酶催化作用、微生物固碳、水生植物光合作用等生物碳泵作用,提高岩溶碳汇潜力;宏观上,应关注人类活动下,气候变化、土地利用方式变化、生态系统服务功能变化等因素下影响。

参考文献

- [1] Parrenin F, Masson Delmotte V, Koehler P, Raynaud D, Paillat D, Schwander J, Barbante C, Landais A, Wegner A, Jouzel J. Synchronous change of atmospheric CO₂ and antarctic temperature during the last deglacial warming[J]. *Science*, 2013, 339(Suppl.1): 1060-1063.
- [2] Friedlingstein P, Jones M W, O'sullivan M, et al. Global carbon budget 2022[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(11): 4811-4900.
- [3] Melnikov N B, O'Neill BC. Learning about the carbon cycle from global budget data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 33(2): L02705.
- [4] Yuan D X. The carbon cycle in karst[J]. *Z. Geomorphol.*, 1997, 108(Suppl.1): 91-102.
- [5] Binet S, Charlier J B, Jozja N, Defarge C, Moquet J S. Evidence of long term biogeochemical interactions in carbonate weathering: The role of planktonic microorganisms and riverine bivalves in a large fluviokarst system[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842: 156823.
- [6] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99: 162-172.
- [7] Liu Z H, Dreybrodt W, Liu H. Atmospheric CO₂ sink: Silicate weathering or carbonate weathering?[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26: S292-S294.
- [8] Pu J B, Li J H, Khadka M B, Martin J B, Zhang T, Yu S, Yuan D X. In-stream metabolism and atmospheric carbon sequestration in a groundwater-fed karst stream[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1343-1355.
- [9] 赵丽华, 吴沿友, 谢腾祥, 李海涛. 微藻无机碳利用在岩石风化及碳循环过程中的作用[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 1-18.
ZHAO Lihua, WU Yanyou, XIE Tengxiang, LI Haitao. Role of carbonic utilization of microalgae on rock weathering and carbon cycle[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 1-18.
- [10] Chen L F, Tan L C, Zhao M, Sinha A, Wang T L, Gao Y L. Karst carbon sink processes and effects: A review[J]. *Quaternary International*, 2022, 652: 63-73.
- [11] Ford D, Williams P. Karst hydrogeology and geomorphology

- [M]. Chichester, UK: Wiley, 2007: 1-562.
- [12] 袁道先. “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.
- [13] 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.
- [14] Zhang M, Yang W, Yang M X, Yan J. Guizhou karst carbon sink and sustainability: An overview[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11518.
- [15] Huang Y D, Li Q. Karst biogeochemistry in China: Past, present and future[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(15): 450.
- [16] 蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕. 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.
JIANG Zhongcheng, ZHANG Cheng, LUO Weiqun, XIAO Qiong, WU Zeyan. Research progress and prospect of carbon sink in karst region of China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 345-355.
- [17] 康卫华, 程从雨, 李为, 余龙江. 微生物在岩溶碳循环中的作用研究回顾与展望[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 453-464.
KANG Weihua, CHENG Congyu, LI Wei, YU Longjiang. Review and prospect of research on the role of mico-organisms in karst carbon cycle[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 453-464.
- [18] Pan H T, Xi Z Q, Yu X T, Sun X Q, Wei X Q, Wang K. Knowledge mapping analysis of international research on acupuncture for low back pain using bibliometrics[J]. *Journal of Pain Research*, 2021, 14: 3733-3746.
- [19] 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]. *Advance in Earth Science*, 2017, 32(5): 535-545.
- [20] 钟亮, 李强. 基于 CiteSpace 软件分析 2017 年度岩溶学研究热点[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(4): 768-776.
ZHONG Liang, LI Qiang. Karst research hotspots in 2017 based on CiteSpace software[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(4): 768-776.
- [21] 莫春梦, 辛胜林, 肖俊波, 王俊明, 张楠. 基于 CiteSpace 的 2010—2019 年岩溶学研究热点分析[J]. *科技和产业*, 2023, 23(1): 152-162.
MO Chunmeng, XIN Shenlin, XIAO Junbo, WANG Junming, ZHANG Nan. Analysis of karst research hotspots from 2010 to 2019 based on CiteSpace[J]. *Science Technology and Industry*, 2023, 23(1): 152-162.
- [22] Liu Z H, 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.
- [23] Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D X, Zeng S B. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [24] Zeng S B, Liu Z H, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5749.
- [25] Cao J H, Yang H, Kang Z Q. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(35): 3766-3773.
- [26] Sun P A, He S Y, Yu S, Pu J B, Yuan Y Q, Zhang C. Dynamics in riverine inorganic and organic carbon based on carbonate weathering coupled with aquatic photosynthesis in a karst catchment, Southwest China[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116658.
- [27] Sun P A, He S Y, Yuan Y Q, Yu S, Zhang C. Effects of aquatic phototrophs on seasonal hydrochemical, inorganic, and organic carbon variations in a typical karst basin, Southwest China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2019, 26: 32836-32851.
- [28] Zhang T, Li J H, Pu J B, Martin J B, Khadka M B, Wu F H, Li L, Jiang F, Huang S Y, Yuan D X. River sequesters atmospheric carbon and limits the CO₂ degassing in karst area, Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 92-101.
- [29] LI J H, PU J B, Zhang T. Transport and transformation of dissolved inorganic carbon in a subtropical groundwater-fed reservoir, South China[J]. *Water Research*, 2022, 209: 117905.
- [30] Li S L, Calmels D, Han G L, Gaillardet J, Liu C Q. Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$: Examples from Southwest China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 270: 189-199.
- [31] Li S L, Liu C Q, Li J, Lang Y C, Ding H, Li L B. Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: Isotopic and chemical constraints[J]. *Chemical Geology*, 2010, 277: 301-309.
- [32] Xu Z F, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang river draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China[J]. *Chemical Geology*, 2007, 239: 83-95.
- [33] Xu Z F, Liu C Q. Water geochemistry of the Xijiang basin rivers, South China: Chemical weathering and CO₂ consumption[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25: 1603-1614.
- [34] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [35] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [36] 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.
- [37] Moon S, Chamberlain C P, Hilley G E. New estimates of silicate weathering rates and their uncertainties in global rivers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 134: 257-274.
- [38] Gaillardet J, Calmels D, Romero Mujalli G, Zakharova E, Hartmann J. Global climate control on carbonate weathering intensity[J]. *Chemical Geology*, 2018, 527: 118762.
- [39] Martin J B. Carbonate minerals in the global carbon cycle[J]. *Chemical Geology*, 2017, 449: 58-72.
- [40] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 204(1-2): 1-21.
- [41] Millot R, Gaillardet J, Dupre B, Allegrec J. Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(7): 1305-1329.
- [42] Dalai T K, Krishnaswami S, Sarin M M. Major ion chemistry in the headwaters of the Yamuna river system: Chemical weathering, its temperature dependence and CO₂ consumption in the Himalaya[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3397-3416.
- [43] Moon S, Huh Y, Qin J H. Chemical weathering in the Hong (Red) River basin: Rates of silicate weathering and their controlling factors[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6): 1411-1430.
- [44] Spence J, Telmer K. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO₂ fluxes: Evidence from major ions, delta C-13(DIC), and delta S-34(SO₄) in rivers of the Canadian Cordillera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(23): 5441-5458.
- [45] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. *Quaternary International*, 1997, 37: 105-113.
- [46] Liu Z H, Zhao J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39: 1053-1058.
- [47] Philippe Gombert. Role of karstic dissolution in global carbon cycle[J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 33: 177-184.
- [48] Ryu S J, Lee K S, Chang W H, Shin H S. Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 66-80.
- [49] Perrin A S, Probst A, Probst J L. Impact of nitrogenous fertilizers on carbonate dissolution in small agricultural catchments: Implications for weathering CO₂ uptake at regional and global scales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 3105-3123.
- [50] Brunet F, Potot C, Probst A, Probst J L. Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2011, 25: 2682-2690.
- [51] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, Li S G, Yu G R, Li K. Carbon uptake by karsts in the Houzhai basin, Southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G4).
- [52] Calmels D, Gaillardet J, François L. Sensitivity of carbonate weathering to soil CO₂ production by biological activity along a temperate climate transect[J]. *Chemical Geology*, 2014, 390: 74-86.
- [53] Curl R L. Carbon shifted but not sequestered[J]. *Science*, 2012, 335(6069): 655.
- [54] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(3): 179-186.
- YUAN Daoxian. On the karst environmental system[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(3): 179-186.
- [55] 袁道先. 岩溶动力系统 and 全球变化: 为《水文地质工程地质》创刊 40 年而作[J]. *水文地质工程地质*, 1997(4): 17-18.
- [56] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(2): 98-100.
- YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 98-100.
- [57] Bulthuis D A. Effects of temperature on the photosynthesis-irradiance curve of the Australian seagrass, *heterozostera-tasmanica*[J]. *Marine Biology Letters*, 1983, 4: 47-57.
- [58] Chen B, Zhao M, Yan H, Yang R, Li H C, Hammond D E. Tracing source and transformation of carbon in an epikarst spring-pond system by dual carbon isotopes (¹³C-¹⁴C): Evidence of dissolved CO₂ uptake as a carbon sink[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125766.
- [59] Yan Z, Shen T M, Li W, Cheng W L, Wang X Y, Zhu M, Yu Q W, Xiao Y T, Yu L J. Contribution of microalgae to carbon sequestration in a natural karst wetland aquatic ecosystem: An in-situ mesocosm study[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144387.
- [60] Shen T M, Li W, Pan W Z, Lin S Y, Zhu M, Yu L J. Role of bacterial carbonic anhydrase during CO₂ capture in the CO₂-H₂O-carbonate system[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 123: 66-74.
- [61] Wang C W, Li W, Shen T M, Cheng W L, Yan Zhuang, Yu L J. Influence of soil bacteria and carbonic anhydrase on karstification intensity and regulatory factors in a typical karst area[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 17-24.
- [62] Romero Mujalli G, Hartmann J, Borker J. Temperature and CO₂ dependency of global carbonate weathering fluxes—implications for future carbonate weathering research[J]. *Chemical Geology*, 2019, 527: 118874.

Analysis of development trend of karst carbon cycle and carbon sink effect based on Web of Science

ZHONG Liang^{1,2}, ZHANG Chunlai^{1,2}, HU Fen³, CAO Jianhua^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Geological Environment Monitoring Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute (Jiangxi Provincial Coal Geological Exploration and Research institute), Nanchang, Jiangxi 330001, China)

Abstract Karstification refers to the chemical dissolution of carbonate rocks by water and the deposition of calcium carbonate due to CO₂ degassing. In a macro sense, karstification can be divided into epikarstification and deep-seated (geothermal) karstification. Karst covers about 22 million km² all over the world, accounting for 15% of the land area, and is of enormous carbon sink potential. Therefore, to alleviate the pressure of carbon neutrality and help China achieve the "Dual Carbon" target, it is of great significance for us to accurately understand the relationship between karst and carbon cycle and the carbon sink effect of karst. As an important tool for us to comprehensively understand the research progress in a specific area, bibliometric analysis can measure the relationship and influence among publications through a series of mathematical and statistical tools, and hence has been applied in many research fields. In order to understand the research hotspots and the development directions in the field of karst carbon cycle and carbon sink effect, this study undertook bibliometric citation analysis on 573 contributions to the literature written from January the 1st, 1991 to June the 6th, 2017, based on the Web of Science core collection. CiteSpace was used to analyze keyword frequency and emergency, country (region) and institution, author impact, research hot spot, co-cited literature and evolution of research topics.

In terms of the number of papers published every year, there were fewer papers published before 2007, with a slow increase from 2007 to 2014 and a significant increase after 2015. The analysis of papers published by national (region) found that the research on karst carbon cycle and carbon sink effect presented distinct regional characteristics, which was mainly led by China, followed by the United States, Europe and other regions. Cluster analysis on the top 100 keywords in 573 papers by CiteSpace software generated 11 clusters which could be summarized and integrated into 5 main clusters: 1) the carbon cycle and carbon sink of chemical weathering of carbonate rocks; 2) the carbon cycle and hydrochemical characteristics in karst water; 3) the soil carbon cycle and carbon sink in karst regions; 4) the impact of ecosystem services on karst carbon cycle and carbon sink; 5) the technology of stabilizing carbon isotopes. The analysis of authors and cited references found that the research team led by Liu Zaihua has inherited and developed the viewpoint put forward by Yuan Daoxian that karstification participates in the global carbon cycle and has a carbon sink effect. Besides, Liu Zaihua team proposed a coupled carbonate weathering model, which greatly promoted the research of karst carbon sink. The analysis of references with the strongest citation bursts shows that citations about coupled carbonate weathering model, impact of karst rocky desertification, climate change and change of land use, effects of sulfuric acid as well as ecological engineering on karst carbon sink have attracted widespread attention in a short term and can represent cutting-edge research hot spots. The time line map and the keyword time zone map of keyword clustering can clearly show the research development in the field of karst carbon cycle and carbon sink in three stages: 1) the initial stage from 1997 to 2006, in which relevant studies show that the global amount of atmospheric CO₂ uptake from weathering of carbonate rocks was estimated at 0.11–0.608 Gt C·a⁻¹, accounting for 15%–30% of global carbon leakage; 2) the stage of rapid development in research on the chemical weathering of carbonate rocks from 2007 to 2014, in which studies mainly focused on the impact of exogenous acids, runoff conditions, and vegetation cover on the weathering of carbonate rocks in different watersheds; 3) the new stage

(下转第 809 页)

precipitation in Longtan trough valley were more positive than those in Maoba syncline. The results of d-excess showed that there was a weak sub-cloud secondary evaporation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Longtan trough valley. The values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline exhibited significant seasonal changes, with negative values during the rainy season (May to October) and positive values during the dry season (November to the following April). (3) The values of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline showed a significant precipitation effect, while the influence of temperature effect is weak. During the same precipitation event, the values of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Longtan trough valley were generally more positive than those in Maoba syncline, indicating that $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline were influenced by elevation effects. (4) The interannual variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in Longtan trough valley and Maoba syncline were mainly affected by the change of the proportion of water vapor transported from Indian Ocean. In the summer of 2020, the proportion of water vapor from the Indian Ocean to the study areas reached 76%, with negative $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation. However, the proportion decreased to 52% in the summer of 2021, with positive $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation. This study is of great significance for the understanding of the water cycle process in the karst trough valley areas of Southwest China and for future studies on the eco-hydrological process of Longtan trough valley and Maoba syncline.

Key words precipitation, hydrogen and oxygen stable isotopes, local terrain, Longtan trough valley, Maoba syncline, Wuling mountain

(编辑 张玲)

(上接第 779 页)

of research on carbon cycle and carbon sink after 2015, in which studies have been conducted under the guidance of karst critical zone theory based on the atmosphere–biology–soil–water–bedrock system, and they mainly focus on the effect of aquatic photosynthesis, considering the impact of climate change and land-use change.

In the future, the research of carbon cycle and carbon sink in karst critical zones should be carried out under the guidance of earth system science theory. At a micro level, studies should focus on the catalysis of carbonic anhydrase in soil, microbial carbon sequestration, photosynthesis of aquatic plants and other biological carbon pumps to improve the potential of karst carbon sink. At a macro level, studies should pay attention to the impact factors such as climate change, change of land use, and change of ecosystem service functions under human activities.

Key words karst carbon cycle, karst carbon sink, bibliometrics, research trends

(编辑 杨杨)