

张建春, 朱江, 何昌德, 等. 喀斯特地区不同尺度水碳耦合过程研究进展[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 261-273.

DOI: 10.11932/karst20250205

喀斯特地区不同尺度水碳耦合过程研究进展

张建春^{1,2}, 朱江^{1,2}, 何昌德^{1,2}, 贾智^{1,2}, 朱利菲^{1,2}, 乙引^{2,3}, 龚记熠^{1,3}

(1. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学西南喀斯特山地生物多样性保护国家林业和草原局重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州师范大学喀斯特地区碳中和教育部工程研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 喀斯特地区由于其独特的地质地貌和生态环境, 已成为全球环境变化研究的重点区域。水循环和碳循环过程及其相互耦合作用在生态系统功能和环境效应方面具有重要意义, 对地区乃至全球的碳平衡和气候变化有着深远影响。文章围绕喀斯特地区水碳耦合过程, 通过系统地回顾和总结当前研究进展, 从叶片到区域不同空间尺度进行梳理, 揭示了喀斯特地区水循环与碳循环之间的耦合机制; 评估了气候变化以及植被恢复、土地利用变化、工程措施等人为活动对水碳耦合过程的影响; 分析了未来潜在的研究热点, 如结合喀斯特地质背景扩展水碳耦合的划分方式, 对喀斯特地区水碳耦合过程进行模拟和预测研究, 完善水碳耦合模型, 提高数据的时空分辨率, 深入研究气候变化及各种人类活动对喀斯特地区水碳耦合过程的影响。对未来开展喀斯特地区水碳平衡研究提供了新的视角, 对于科学制定喀斯特地区水资源和碳平衡管理政策具有积极意义。

关键词: 喀斯特; 水循环; 碳循环; 水碳耦合; 水分利用效率

创新点: 在研究视角上, 突破传统, 提出应结合喀斯特土壤、地质特性将水碳耦合研究从 SPAC 拓展至 SRPAC 系统。研究尺度上, 综合运用多源数据及多种技术从叶片到区域多尺度剖析喀斯特水碳耦合。全面探讨多种影响因素, 为该领域研究提供新思路与方法。

中图分类号: P339; X171.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2025) 02-0261-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

自人类世(Anthropocene)以来, 全球气候变化引起极端高温、水资源匮乏问题日益严重, 已成为国际上公认的主要的全球性环境问题之一^[1-2]。以大气中 CO₂ 浓度增加为主要特征的“碳问题”和以淡水资源匮乏为主要特征的“水问题”引发了全球范围内对陆地生态系统碳循环和水循环的研究热潮^[3]。中国是全球最大的碳排放国, 既担负着碳减排的重任,

也面临着水资源稀缺和利用率低的矛盾。2020年9月, 中国政府提出了“碳达峰”和“碳中和”的目标^[4], 水资源使用和 CO₂ 排放是“双碳”目标中重要的环境战略要素。为解决气候变化问题, 达到温室气体净零排放的目标, 对大气中过量 CO₂ 进行有效固定的碳汇研究也是当前的一个热点。碳酸盐岩的化学风化过程会消耗大量大气或土壤中的 CO₂, 是喀斯特地区特有的地球化学过程^[5]。喀斯特碳汇资源丰富, 开发利用潜力巨大, 在响应国家“双碳”倡议的背景

资助项目: 贵州省科技成果转化重点项目“喀斯特石漠化生态恢复技术集成与示范”(黔科合成果[2022]重点010); 贵州省教育厅“揭榜挂帅”科技

攻关项目“喀斯特石漠化水肥耦合与生物多样性恢复”(黔教技[2023]004号)

第一作者简介: 张建春(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地区石漠化治理研究。E-mail: 272444891@qq.com。

通信作者: 龚记熠(1985—), 男, 硕士, 高级实验师, 主要从事生态水文学研究。E-mail: 201307048@gznu.edu.cn。

收稿日期: 2024-09-04

下,具有重要意义,其可能是全球碳循环研究领域中遗漏碳汇(missing sink)的关键组成部分^[6]。深入探究喀斯特地区水碳耦合过程,对于全面解析碳循环机制及应对气候变化提供了关键视角,也可以为理解该地区复杂生态系统奠定基础。

喀斯特(亦称岩溶)是水对可溶性岩石(碳酸盐岩)进行以地下溶蚀作用为主辅以机械侵蚀作用,形成的沟槽、裂隙和溶洞等特殊地貌景观^[7]。碳酸盐岩作为可溶性岩石,含有大量的化合态碳,这些碳通过岩石风化、植被吸收和土壤呼吸等过程与大气中的 CO_2 相互作用,导致喀斯特碳循环的发生^[8]。喀斯特碳循环路径与过程相较于其他生态系统更为复杂,喀斯特作用下的碳汇量估算仍然有很大的不确定性,易受气候变化、土地利用变化、外源酸干扰、碳酸盐再沉淀诸多因素影响^[9]。在多种地质过程和 CO_2 - H_2O - CaCO_3 耦合系统的作用下,喀斯特地区形成了独特的地表-地下结构,不仅促进了水岩作用的发生,还加速了地表与地下之间的碳交换^[10-11],碳循环过程十分活跃。值得注意的是,在碳迁移过程中水扮演着多重关键角色,其动态变化深刻影响着碳的赋存形态与转化速率,紧密连接起整个喀斯特生态系统的碳循环网络。

在喀斯特水碳耦合过程中,水既是溶剂,溶解碳酸盐岩中的碳以及大气中的 CO_2 ,为各种化学反应提供物质基础;又是反应物,直接参与碳酸盐岩的风化等过程,推动碳循环进程;更是运输载体,将碳在大气、岩石、植被和土壤等不同介质之间进行传递。喀斯特地表介质具有极大的空间异质性,相较于其他地区,其水文过程更为复杂^[12],与降雨、土壤、植被、岩性、表层岩溶带结构等密切相关^[13]。喀斯特地区的水是雨水、地表水、地下水“三水”循环交流,在时空上相互影响、转化。在喀斯特水文进程中,地下过程起着关键作用,地下水循环是水碳耦合过程的重要驱动力,地下水能够在岩石的孔隙、裂隙和溶洞中流动和储存^[14],可以在干旱季节提供稳定的水源,水体富含溶解有机碳且具有快速的碳循环速率,对碳的固定和释放影响较大。此外,地下水循环还影响土壤中的碳含量和分布。例如,在喀斯特森林地区,地下水循环可以促进植被生长,从而增强碳酸盐岩的化学风化过程,吸收更多的 CO_2 ^[15]。

因此,喀斯特地区的水、碳循环过程并非独立存在,而是相互耦合的生态学过程^[16]。耦合作为系统

科学中的经典概念,它描述了复杂系统中两个或多个独立组件之间的内在联系和相互作用产生物质或能量交换过程^[17]。喀斯特地区生态环境脆弱敏感,由于独特的地质和地形条件,形成了土层薄、水土流失严重、植被覆盖率低和养分易流失的脆弱生态系统,所以喀斯特地区水碳耦合过程更为复杂,并且受到自然因素(如地质构造、降雨等)和人为活动(如水资源开发、土地利用变化等)的影响。因此,深入研究喀斯特地区的水碳耦合过程对于全面了解该地区的生态系统功能和环境效应具有重要意义。文章在分析喀斯特地区的生态特征和水资源情况的基础上,通过与非喀斯特地区水碳耦合进行比较,从不同尺度系统梳理相关研究进展、揭示喀斯特地区水碳耦合过程的特征和影响因素,分析当前存在的问题以及未来潜在的研究热点,以期对喀斯特地区的水资源管理和碳循环研究提供科学依据和技术支撑。

1 喀斯特地区水—碳耦合的基本过程及评估方法

陆地生态系统的水循环和碳循环是通过土壤、根系、叶片以及大气之间多个相互关联的过程耦合起来的^[18],根据水和碳在土壤—植被—大气连续体(SPAC)中的迁移过程,通常将水碳耦合作用划分为:大气—植被间的水碳耦合、大气—土壤间的水碳耦合、植被—土壤间的水碳耦合、和植物体内的水碳耦合四个关键环节,其耦合节点分别为气孔节点、大气—土壤节点、植被—土壤节点和生化节点^[3]。然而,喀斯特地貌是不同于非喀斯特地区的独特生态系统,土壤层浅薄且具有大量可溶性岩石,储蓄的水分通常难以满足植物生存和生长的水分消耗,在土壤/岩石交错的垂直岩溶带底部或相对阻水的岩层上部(即表层岩溶带),雨季或雨后具有一定的蓄水能力^[19],是维持植被生长和抗旱的重要水源^[20]。因此,需要将土壤—植被—大气系统(SPAC)拓展至土壤—岩石—植被—大气系统(图1)^[5],充分考虑喀斯特地区土层浅、富钙、碱性强;水资源贫乏等特点,从更长的时间尺度研究 SRPAC 中水碳耦合机制。

生态系统中的碳循环和水循环通过光合作用和蒸散发过程紧密耦合,其耦合机制在不同尺度的多个层面上密切相关。水分利用效率(WUE)是植物固碳与耗水的比例^[21],可作为衡量植物抗旱性和揭示

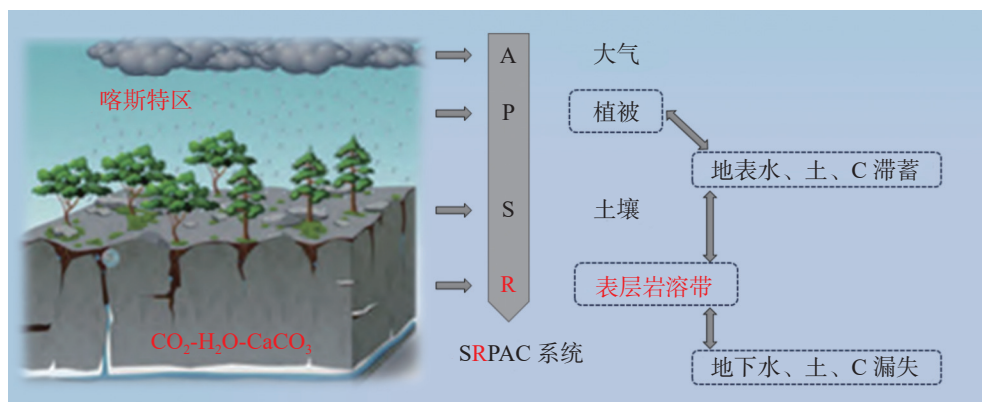


图1 喀斯特土壤-岩石-植被-大气系统(SRPAC)(据文献[5]修改)

Fig. 1 Soil-Rock-Plant-Atmosphere-Continuum (SRPAC) in karst area (Revised based on reference [5])

水-碳交换过程及耦合作用的重要指标。值得注意的是,与非喀斯特环境相比,喀斯特地区地形特征复杂,植被覆盖状况、土壤物理特性及水文过程皆具独特性^[22],这些因素协同作用,共同影响生态系统WUE的特征。此外,许多学者分析了温度、降水等气候因子与水分利用效率的关系^[23],研究表明喀斯特地区生态系统WUE明显低于非喀斯特地区,但呈快速增长趋势,喀斯特地区WUE对降雨更敏感。由此可见,环境因素对喀斯特地区WUE的影响可能不同于非喀斯特地区。目前对水碳耦合关系的研究主要集中在叶片水分蒸腾和CO₂吸收转化的微观尺度上,且研究区域多集中于非喀斯特地区,缺乏对不同空间尺度下喀斯特地区水碳关系进行全面梳理。并且,水分利用效率在各个尺度的概念和适用范围往往混淆不清,界定不明。因此,下文总结了从叶片到区域不同空间尺度下水碳耦合过程,对各尺度水分利用效率的定义和适用范围进行梳理。

1.1 叶片尺度水碳耦合

气候变化背景下植物气孔行为、光合速率以及蒸腾速率的研究逐渐成为新的焦点^[24]。气孔作为控制植物叶片与外界环境之间水气交换的重要通道,其双向调节光合和蒸腾机制是研究植物体内水碳耦合机制的基础。目前关于气孔行为调控、植物化学信号以及蒸腾水力信号传导的研究大多聚焦在植物气孔导度对根系主要化学信号ABA、植物水力信号及其与化学信号相互作用的响应等方面^[25-27]。从水碳耦合视角来看,当前基于叶片尺度气孔导度模型是支撑生态系统和区域尺度蒸散发遥感反演的理论基础。从叶片尺度扩展到植物冠层尺度的气孔导度

模型,其演变过程经历了从单个大叶模型发展到双叶模型,以及后来进一步发展到多层-双叶模型^[28]。

叶片尺度水碳耦合过程对喀斯特生态系统和水资源的可持续利用具有重要意义。在这一尺度上,水分利用效率为叶片净光合速率和蒸腾速率的比值,一般用气体交换法^[29]和稳定同位素技术^[30]来测定。前者多用于研究植物短期水分利用状况(推算瞬时水分利用效率WUE_i)或植物对环境因子改变的生理响应,但适用范围较小,仅适用于叶鳞^[31];后者测定叶片在一段时间内的水分利用效率,具有较高的灵敏度和精度,但成本昂贵,且测定技术要求较高。目前,基于双同位素比值方法的各种混合模型(包括线性混合模型^[32]和贝叶斯混合模型^[33])已被开发用于判断植物利用水分的来源、体现植物用水格局。这些多源混合模型对于理解复杂自然生态系统(如喀斯特生态系统)中植物水分来源和用水分配模式具有重要意义。

与非喀斯特地区不同,喀斯特地区植物全年蒸腾变化方式通常取决于植被根系深度和根区水分有效性这两个关键因素^[34]。该地区土壤空间异质性强,又会对二者产生重要影响。厚层土壤利于植物生长,能为根系提供更多水分、养分和空间,其下草本植物(如多年生黑麦草、羊茅)根浅,根区水分有效性高,主要靠纤维根系从表层土吸收水分和养分^[35]。浅层土壤或表层岩溶带缺土时,地下空间窄、储水能力弱,水分易受到气候条件影响而蒸发或流失,干旱季浅层土壤水分减少使根区水分有效性降低,植物通过特殊生理结构和策略(如干旱落叶树种落叶减少蒸腾)应对干旱^[36]。无土壤覆盖的石山,植被根系需寻找其他生长支撑和水分来源,部分植物通过附着岩

石表面或裂缝形成特殊根系结构(附生植物用气生根从空气吸收水分和养分、石生植物根系深入岩石裂缝取水)。

除了上述根系发育机制外,还有其他几种影响植物蒸腾的机制和策略,包括提高内在水分利用效率(WUEi)^[37],形成具有更厚角质层或蜡层和发育良好的表皮毛的叶片^[38],降低气孔导度和光合速率^[39],甚至降低增长率。由于喀斯特生态系统的高度异质性,其植被的蒸腾动力、蒸腾水源和水分利用策略的性质可能因地区和季节而异。因此,研究叶片尺度水碳耦合过程不仅有助于深入理解喀斯特地区生态系统的功能和稳定性,也为喀斯特地区的水资源管理和生态保护提供重要的科学依据。

1.2 植株尺度水碳耦合

个体植株在水碳耦合过程中展现出显著的空间异质性,这不仅受到植被类型和生长阶段的影响,还受到阳光照强度、局部土壤水分状况等环境因素的调节。喀斯特地区的独特地质结构直接影响了土壤水分的分布和植被生长,主要表现为植被对水分和碳的利用权衡。其中,由于地下水位深的裸地区域,植被对水分的利用效率较低,因此碳的吸收和储存较为有限;而洼地的植被由于地下水位较浅,其蒸腾作用和光合作用较为活跃,对水分和碳的利用较为高效。这种差异性导致了喀斯特地区不同地形的水碳循环效率差异,从而影响了土壤碳储存和表层土壤碳排放速率。喀斯特地区地质条件特殊,地表水渗漏严重、水文过程迅速等导致降雨后湿润环境只能维持数日,干旱频发,严重影响植物的生长和分布。因此,利用乡土植物和适生种对喀斯特脆弱的生境进行恢复和改良逐渐成为喀斯特生态系统恢复与重建的重要途径^[40]。基于此,越来越多的研究者选择顶坛花椒、小蓬竹、尾巨桉、麻疯树等乡土植物为材料,探究其水分利用率的日变化、季节变化及其与主要环境因子的关系,以了解这些植物的水分利用状况,为其作为喀斯特地区恢复树种提供科学依据。

植株尺度的水分利用效率(WUEp)是指一定时期内累积生物量与蒸腾水量的比值,取决于碳捕获总量和整株植物的失水,包括光合和非光合部分的失水和呼吸^[41]。植株尺度 WUE 参数可以通过传统称重法^[42]和树轮稳定碳同位素方法^[43]进行测定,前

者适用于盆栽植物,通过称量植物一段时间内干物质的积累量与整个生长阶段的耗水量,计算其比值得到 WUE;后者适用于林木个体,通过打生长锥获取个体树芯,可推算过去几十年,甚至上百年的树木生长信息^[44]。研究表明:植物在干旱条件下 WUE 较低,其主要限制因子是土壤水分;干旱程度减轻以后,植物生长速度随着土壤水分的增加而提高;当水分充足时,植物生长将不受土壤水分的限制,但蒸发率随着土壤水分的增加而快速提高,导致 WUE 下降^[24];喀斯特地区的植被适应了其特有的干旱条件, WUE 增长趋势快速,这种适应性在碳固定和水分循环中起到关键作用。张桂玲等^[45]以普定次生林通量观测站内的喀斯特次生林为例,对连续干旱条件下 8 种常见植物的叶片进行了测定分析,结果表明,藤本植物的 WUE 普遍高于乔木和灌木植物的 WUE,常绿植物的 WUE 与落叶植物的 WUE 没有明显差异。

目前,与光合作用和蒸腾作用相关的植株尺度生理过程是通过树干茎流计法和箱式法系统测量的,这两种方法可分别用于测量整株植物的蒸腾率和冠层的 CO₂ 净交换率。但是,基于这两种方法的结合,在植株尺度上同步水碳过程的研究相对较少^[24]。未来可结合多种方法和仪器,在短时间尺度上测量植物在不同环境因素下的 WUE,从而探索植物在个体尺度上对环境变化的适应机制。

1.3 生态系统尺度水碳耦合

生态系统尺度上水碳耦合机制的研究主要聚焦于水热环境和 CO₂ 浓度效应。在这一尺度上 WUE 一般为净生态系统初级生产力和耗水量的比值^[46]。与其他陆地生态系统相比,喀斯特生态系统的水碳耦合过程较为复杂,探究其驱动机制也成为近几年的热点。喀斯特作用是全球碳循环的重要组成部分,其碳循环过程由地下水循环驱动^[47]。有研究表明:大部分从陆地向海洋输送的碳来自喀斯特作用^[48],喀斯特固碳通量主要取决于岩溶水径流量^[49]。喀斯特植被特殊的水文效应可以增强流域的降水和径流过程^[50],降雨的增加反过来又能促进碳酸盐岩的溶解^[51]。因此,植被生长过程对大气具有固碳作用。关于喀斯特水体系统中溶解无机碳(DIC)向溶解有机碳(DOC)转化过程中的碳氮耦合循环研究表明^[52],DIC 和硝酸盐的转化主要受水下群落代谢过程的控制,伴随着 DOC 的形成。这种原生 DOC 的产生代

表了喀斯特水生系统中相对长期的自然碳汇。

当前,以“涡度相关技术”和“稳定同位素技术”作为研究方法评估生态系统尺度水碳耦合过程已成为当前的主流,主要内容包括:基于通量站点涡度相关系统的观测数据探究生态系统水碳耦合规律,构建不同尺度水碳耦合模型^[53],通过时间序列动态过程进行尺度推演,结合GIS、遥感和模型等方法模拟和预测水碳耦合机制,将小尺度的水碳关系的变异规律推演到更大的时空尺度上,探究整个生态系统水碳通量双向反馈作用机制,并预测其未来变化趋势^[54]。由于系统结构的复杂性和研究手段的局限性,今后的研究工作仍需加强。水碳资源评价模型的应用需要结合实际情况在方法和技术上进行创新,促进水文、土壤、气候和生物知识的整合与共享,优化利用多源数据^[24]。同时,结合先进的遥感技术和模型模拟方法,可以更精确地评估和预测喀斯特地区水碳耦合过程的动态变化,为有效管理和保护喀斯特地区的生态环境提供科学依据。

1.4 区域尺度水碳耦合

在流域尺度上,喀斯特地区水碳耦合主要表现在植被固碳过程对土壤水分的消耗与对产汇流的调节、降水和径流过程对地表有机物的冲刷和输移等^[55]。石漠化所导致的水土流失问题已成为多年来制约我国西南地区的生态安全和可持续发展难题,因此探求喀斯特地区WUE时空分布及驱动因素,对于当地生态建设具有重要意义。随着遥感技术的发展,目前已出现针对流域尺度的综合观测实验系统,通过结合传统地面观测与航空遥感设备构建覆盖全流域的气象、水文、生态环境综合观测网,可对水循环与碳循环要素进行多尺度观测实验。孙桂凯等^[56]基于遥感数据定量计算西江流域植被WUE,分析2001—2018年西江流域WUE的时空变化特征,结果表明,气候因子、归一化植被指数(NDVI)、海拔、人类活动均不同程度影响西江流域植被WUE,这为西南喀斯特地区石漠化治理和流域生态防护林体系的建设提供参考。

通常用碳通量与水通量的比值来表示区域尺度的WUE,由于研究尺度过大,只能通过估算植被总初级产生力(GPP)、净初级产生力(NPP)或净生态系统生产力(NEP)除以蒸散发量(ET)来计算^[57]。当前还不能对于较大尺度的水、碳通量进行精度更高、

机制更强的估算,普遍利用降水利用效率(PUE)来表征水、碳之间的耦合关系^[58],部分学者估算全球植被生产力的研究结果表明,生态系统中40%的植被其GPP与降雨影响关系明显^[59]。随着全球通量网络(FLUX)的建设和遥感技术的改进,区域尺度乃至全球尺度水碳耦合模型的构建得以实现^[60],尤其是基于站点尺度水碳耦合规律,通过遥感手段进行尺度外推,开展模型验证和优化,改进模拟效果,可以提高水碳模型在喀斯特生态系统中的适用性^[61],并提高区域尺度上WUE估算的精度,但这些模型仍缺乏机理解释。将遥感蒸散发和植被生产力模型相结合的数据同化优化方法在区域尺度上对WUE估算提供了更强的机理解释,将是未来量化喀斯特区域大面积水分利用效率的有效方法。今后,利用卫星遥感数据定量评估生态需水量和固碳能力,是开展喀斯特植被水碳耦合机理研究的基础。此外,由于人类活动已经严重渗透到生态系统过程中,分析人类活动对于喀斯特地区水碳耦合驱动机制的影响,也应成为今后研究的重点。

2 影响水碳耦合的因素

喀斯特地区的水循环和碳循环既紧密联系又相互影响,水循环对碳循环的影响主要体现在水分供给的变化可以调节地表植被的生长状况,进而影响碳的固存与释放;同时,水体的运动过程也会对碳的迁移与转化产生重要影响。反过来,碳循环通过调节大气组成和土壤特性,间接影响水分的蒸发和下渗,影响水循环的过程。喀斯特地区水碳耦合过程受到气候变化、植被覆盖、土地利用变化及人为活动等多重因素共同影响,这些因素相互作用,影响水资源和碳循环的变化。因此,在研究喀斯特地区水碳耦合过程时,需要综合考虑这些因素,以实现喀斯特地区水资源和碳循环的可持续发展。

2.1 气候变化的影响

气候变化主要通过改变降水模式、提高气温、加速蒸散以及降低地表湿度等途径对陆地生态系统产生影响,特别是水文和生物地球化学循环^[62]。例如,气温上升和降水变化可以通过改变蒸散(ET)和调节植物生理过程来改变水循环和碳循环^[63-64],对喀斯特生态系统产生积极或消极的影响。由降水不足和水

文失衡造成的干旱问题会引起植被冠层结构的变化,增加树木死亡率,引发森林火灾^[65],从而影响喀斯特生态系统水碳循环的耦合。植被功能类型和水资源供应的变化会影响生态系统的生产力,不同干旱条件下陆地生态系统中生物(即碳同化)和物理(即水消耗)过程的不同作用和特征会导致对气象和土壤干旱事件的碳增益和水利用的不同响应^[66]。在区域尺度上,气候变化引发的降水格局变动对喀斯特地区水碳耦合过程影响显著。降水总量降低时,地表水减少、地下水位下降,抑制岩石中碳的释放,限制植被生长与光合作用,生态系统固碳能力降低;而降水增加能加速岩石风化溶蚀、促进碳释放,利于植被生长与碳吸收。

在全球气候变化的背景下,西南喀斯特地区极端降雨事件发生频率增高,高敏感性和脆弱性使得喀斯特生态系统在面临极端气候事件时存在巨大的灾害风险。喀斯特小流域作为一个相对独立完整的生态水文单元,是受独特地质结构、地形以及相应气候条件(降水量、温度等)、土壤状况等多因素综合影响的结果。喀斯特小流域的气候条件对水碳耦合过程高度敏感,表现出显著特征:(1)降水量多但年内分布不均,暴雨频发导致水土流失严重;(2)喀斯特地区气候通常较为温暖,尤其是在夏季。温暖湿润的气候利于植被生长,但也可能导致土壤侵蚀加剧,特别是在暴雨期间;(3)喀斯特地区土壤较为贫瘠,土层薄,且土壤侵蚀严重。植被恢复可以有效改善小流域的气候和减少水土流失^[67]。因此,研究喀斯特小流域气候有助于理解生态系统如何在气候变化下通过水碳耦合过程进行自我调节和适应,对于保护喀斯特地区生态环境和生态系统服务功能具有重要意义。

目前,由于水文学和生物地球化学之间的学科重点不同,模拟水碳耦合的工具还很缺乏,关于气候变化对水—碳耦合循环影响的综合性研究并不常见。为了解决这个问题,吴一平等^[68]结合 SWAT 和 DayCent(CENTURY 生物地球化学模型的每日步长版本),开发了 SWAT-DayCent 模型,实现综合水文生物地球化学模拟。尽管耦合模型已经显示出其同时模拟水循环和碳循环的能力^[69],但它尚未用于预测未来气候变化的影响。因此,深入了解未来气候变化对水文和生物地球化学循环的影响,对生态系统管理和相关政策制定具有重要意义^[70],这也是全

球变化研究领域的重要关注点。

2.2 植被恢复措施的影响

植被恢复措施可以增加植被覆盖度,提高植被的净初级生产力,从而增加碳固定和水源涵养能力。植被的根系系统可以增强土壤的保水能力,减少土壤中水分的蒸发和径流损失,从而提高流域的水资源利用效率。同时,植被的光合作用可以吸收大量的二氧化碳,并将其转化为有机物质,有助于减少大气中 CO_2 浓度,缓解温室效应。植被恢复还可以降低土壤侵蚀和水土流失的风险,保护水资源和土壤的可持续利用。有研究发现,喀斯特流域植被覆盖的明显变化会引起水量发生显著变化,温度升高会导致植被活动增强和蒸散加大,但 CO_2 浓度上升会通过调节植物生理活动而降低蒸腾^[71]。

人工造林和森林恢复是实现碳减排和减少土壤侵蚀的两种常见方法。喀斯特地区作为一个脆弱的生态系统,当地植被动态和经济受到了重大影响^[72]。为缓解喀斯特地区严重的石漠化和改善生态退化状况,近三十年来,中国实施了退耕还林、封山、喀斯特石漠化综合治理等大规模有效的石漠化治理措施^[73]。这些干预措施对下垫面产生了持续而深刻的影响,导致西南地区植被覆盖度和碳固存(CS)发生了显著变化。再者,以往实施生态修复工程时,其类型、程度和空间布局与区域水资源的时空格局没有科学匹配,对水文形势的潜在不利影响也没有得到充分考虑。在流域尺度上,植被面积的增加将会增加河流的蒸发能力和减少径流,从而导致区域可用水资源减少。

为研究上述潜在问题,评估植被绿化对区域内碳循环和水循环的影响至关重要。植被指数(LAI)是反映植物光能利用的综合指标,归一化植被指数(NDVI)用于评估植被的生长状态和覆盖度,与生态修复效益密切相关,对水分利用效率(WUE)有显著影响。在研究植被绿化引起的蒸散发(ET)失水对实施生态修复工程地区 WUE 的影响时,必须考虑 LAI 和 NDVI。已有研究表明,年 NDVI 对 WUE 变化的敏感性较高^[74],LAI 的增加是 WUE 提高的主要影响因素。这说明植被恢复可消耗更少的水来吸收更多的碳,这将进一步抵消喀斯特地区植被恢复后强光合作用消耗的水资源。因此,未来的研究应利用植被生长机制模型来量化植被对水的消耗和固定,以

提高对植被恢复与水循环之间反馈关系的认识。

2.3 土地利用变化的影响

土地利用变化是人类社会经济活动对陆地表层作用的综合反应,在喀斯特地区,它直接影响地表水流和碳迁移路径,间接通过改变土壤微生物活动^[75]和植被覆盖度等影响碳储存能力及碳循环过程。人类活动的干扰会导致陆地表层覆被状况发生变化,进而直接或间接地影响碳循环过程^[76]。许多研究表明,土地利用和植被覆盖变化将通过土壤 CO_2 ^[77]、径流^[78]和外源酸^[79]三种方式影响喀斯特作用:首先,生态条件好的土地生产力、生物量高,土壤呼吸作用强,导致土壤 CO_2 浓度高^[80];其次,土地利用和覆被变化显著改变了喀斯特地表条件,导致地表水文过程(蒸散、土壤水分、土壤入渗速率等)发生相应变化,限制了流域径流输出;第三,人为土地利用变化可能带来硫酸、硝酸等外源酸,干扰自然喀斯特作用。此外,土地覆盖对喀斯特生态系统的影响可能是双向的;森林恢复一方面可以通过增加土壤 CO_2 浓度来增强喀斯特碳汇效应,另一方面由于林冠截流削弱了径流,对喀斯特效应产生了负面影响^[81]。

造成土地利用变化的驱动因素主要分为两类^[82]:生物物理驱动因素和社会经济驱动因素。前者包括自然环境的特征和过程,如海拔、坡度、土壤类型和气候变量,而后者主要包括人口、社会、经济、政治和技术因素。许多研究表明,人口压力、经济发展等因素是近期造成土地利用变化的主要原因^[83],而土地利用变化又改变了水资源的分布,土地利用变化通过干扰水能平衡关系来影响喀斯特流域的水文和降雨径流过程,而降雨是土壤养分流失的主要驱动因子^[84]。此外,土地利用变异性影响喀斯特水资源的时空分布,加速了水文循环过程中水资源变化的复杂性和不确定性。因此,未来应加强对土地利用变化与水资源相互关系的长期动态监测和模拟研究,以更好地预测和应对未来可能出现的水资源和生态问题,为喀斯特地区的生态修复和资源合理利用提供更科学的依据。

2.4 工程措施的影响

隧道建设、水库建设等工程措施带动了喀斯特地区经济发展,然而也对水碳耦合过程产生了负面影响。隧道开挖导致地表水干涸和地下水流失可能

使植物受到的水分胁迫更加严重。目前,隧道建设对植物群落结构动态变化或植物生理生态效应的影响探讨较少^[85]。其中吴超等^[86]研究喀斯特槽谷典型植物 WUE 对隧道建设的响应,结果表明,隧道建设导致地下水资源漏失,土壤含水量减少,进而改变了植物水分利用特性,使隧道影响区植物种应对一定程度的水分胁迫时采取更保守的水分利用策略。李计等^[87]开发了一种基于隧道穿透喀斯特含水层流动的物理模型,隧道子模块可以关闭,以提供自然喀斯特环境下的流量估计。模型试验表明,隧道施工使地下河流的流量减小,且在基流条件下减小幅度最大。郑小康等^[88]建立了深埋广阔隧道施工的岩溶含水层三维(3-D)耦合模型,定量评价隧道施工对喀斯特地下水系统的时空特征。他们还使用模型模拟结果来预测隧道衬砌完成后地下水将恢复到的水平。

水利工程建设对流域内水资源的蓄积和调度起到了重要作用,同时也对碳汇和碳排放产生了影响。当前,国际上一般将水库为碳源,喀斯特地区水利水电工程的发展受到严重制约,然而这一认识并未从喀斯特水库修建对流域的生态影响进行分析,基于此,一些学者利用多源遥感数据定量分析了2000—2020年小型喀斯特洼地水库对流域尺度水碳循环的影响^[89],结果表明岩溶洼地水库不仅是温室气体排放的主要来源,它也可有效提高其控制流域的陆地碳汇和地表水可利用资源,对于维持喀斯特地区水-碳循环的可持续性,实现水资源高效利用以及碳达峰碳中和目标具有重要意义。王万发等^[90]研究了亚热带喀斯特流域的碳-生物地球化学过程,结果表明,在喀斯特河流梯级筑坝之后,影响喀斯特河流溶解无机碳的主要过程由单一的碳酸盐风化转变为碳酸盐风化、碳酸盐降水、初级生产和有机质降解共同调控。由于喀斯特地区的地下管道、裂缝、洞穴和地下溪流的广泛开发,地表水通过喀斯特裂缝和管道网络迅速渗入地下,导致地表水缺乏。大量喀斯特地区不属于大型水利设施集中供水范围,且这些地区的地下水也很深,导致可用水量少。在全球气候变化对水循环的影响下,喀斯特地区的缺水状况更加严重。建造灌渠、抽取地下水等工程措施直接取水作用于水资源,从而对流域水资源数量(流域径流变化)、水资源时空分布特征产生影响。

在气候变化的背景下,揭示喀斯特地区水资源安全的变化机制迫在眉睫。有研究发现在喀斯特地

区水资源的合理利用和碳循环的优化管理对提高水资源利用效率和保护环境具有重要意义^[91]。因此,应采取有效措施减少对水碳耦合过程的影响,促进喀斯特地区水—碳循环的均衡与协调,如合理规划建设项目、提高资源利用效率、开展低碳建设等。

3 展 望

喀斯特地区水碳耦合过程呈现出明显的时空异质性,受多重因素综合作用。为了准确理解喀斯特地区水碳耦合机制,需要从不同的尺度进行全方面研究。与陆地生态系统碳通量观测和地下水监测系统充分对接,加强喀斯特地区水资源和碳汇管理,促进水循环和碳循环的良性互动,建立综合的(水、岩、土、大气、生物)水碳循环监测体系。将喀斯特碳汇与土壤、森林、等各类碳汇整合在一个研究框架下,有利于宏观调控系统整体碳循环和碳汇,有助于寻找更高效、可靠的固碳方法。此外,由于喀斯特地区具有独特的生态特征,其水质与养分循环有关,而养分循环又与生态水文有关。土地利用影响生态水文,而生态水文又反过来影响泥沙的运移。这种协同作用就要求必须采取跨学科的方法来开展研究。

未来的研究可以从以下四个方面展开:一是将水碳耦合的划分由传统的土壤—植被—大气系统(SPAC)拓展至土壤—岩石—植被—大气系统(SRPAC),深入分析水循环和碳循环之间的相互作用机制;二是进一步完善水碳耦合模型,建立与喀斯特区域具有高匹配的模型,提高模拟预测的准确性和应用范围;三是加强数据采集和监测网络建设,提高数据的时空分辨率;四是开展喀斯特地区水碳耦合过程的模拟和预测研究,更加关注气候变化和人类活动对喀斯特地区水碳耦合过程的影响,以更好地服务于区域水资源保护和生态修复工作。

参考文献

- [1] Mukheibir P. Water access, water scarcity, and climate change[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(5): 1027-1039.
- [2] Swain S S, Mishra A, Sahoo B, Chatterjee C. Water scarcity-risk assessment in data-scarce river basins under decadal climate change using a hydrological modelling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125260.
- [3] 赵风华, 于贵瑞. 陆地生态系统碳—水耦合机制初探[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 32-38.
- ZHAO Fenghua, YU Guirui. A Review on the Coupled Carbon and Water Cycles in the Terrestrial Ecosystems[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(1): 32-38.
- [4] Piao S, Yue C, Ding J, Guo Z. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(6): 1178-1186.
- [5] 陈喜, 张志才. 喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 356-364.
- CHEN Xi, ZHANG Zhicai. An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 356-364.
- [6] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. 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(3-4): 162-172.
- [7] 樊千涛, 马姜明, 于名召, 贺桂珍. 漓江流域喀斯特综合干扰评价及其空间特征[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1404-1417.
- FAN Qiantao, MA Jiangming, YU Mingzhao, HE Guizhen. Comprehensive disturbance evaluation of karst and its spatial characteristics in the Lijiang River Basin, Guilin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1404-1417.
- [8] Chen L, Tan L, Zhao M, Wang T, Gao Y. Karst carbon sink processes and effects: A review[J]. *Quaternary International*, 2023, 652: 63-73.
- [9] 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.
- [10] 覃蔡清, 李思亮, 岳甫均, 丁虎, 徐胜, 刘丛强. 喀斯特关键带溶解性碳的迁移转化过程及其对降雨事件的响应[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 1128-1139.
- QIN Caiqing, LI Siliang, YUE Fujun, DING Hu, XU Sheng, LIU Congqiang. Biogeochemical processes of dissolved carbon in the karst critical zone and its response to rainstorms[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(4): 1128-1139.
- [11] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 1-332.
- YUAN Daoxian, CAI Guihong. The science of karst environment [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 1-332.
- [12] 刘梅先, 徐宪立. 气候变化及人为活动驱动下的西南喀斯特生态水文研究评述[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 930-936.
- LIU Meixian, XU Xianli. Ecohydrology in karst region of southwestern China under changing climate and human activities: A review[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 930-936.
- [13] 何洁, 严友进, 易兴松, 王勇, 戴全厚. 喀斯特地区土壤异质性

- 及其与植物相互作用[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2249-2258.
- HE Jie, YAN Youjin, YI Xingsong, WANG Yong, DAI Quanhou. Soil heterogeneity and its interaction with plants in karst areas[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2249-2258.
- [14] 罗毓融, 胡稳, 杨青. 不同喀斯特岩性区森林生态系统水源涵养功能分析[J]. *贵州科学*, 2019, 37(1): 54-59.
- LUO Yurong, HU Wen, YANG Qing. Water conservation function of forest ecosystem in different karst lithologic areas[J]. *Guizhou Science*, 2019, 37(1): 54-59.
- [15] Liu X, Fu Z, Zhang W, Xiao S, Chen H, Wang K. Soluble carbon loss through multiple runoff components in the shallow subsurface of a karst hillslope: Impact of critical zone structure and land use [J]. *Catena*, 2023, 222.
- [16] 姜林林, 贾黎明, 刘聪. 陆地生态系统碳·氮·水耦合机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(14): 8277-8283.
- JIANG Linlin, JIA Liming, LIU Cong. Research advances in the coupling of interactive functions between carbon, nitrogen and water cycles in terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(14): 8277-8283.
- [17] Wang M, Sun C, Wang X. Analysis of the water-energy coupling efficiency in China: based on the three-stage SBM-DEA model with undesirable outputs[J]. *Water*, 2019, 11(4): 1-15.
- [18] Qiu B, Xue Y, Fisher J B, Guo W, Berry J A, Zhang Y. Satellite chlorophyll fluorescence and soil moisture observations lead to advances in the predictive understanding of global terrestrial coupled carbon-water cycles[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32: 360-375.
- [19] 陈喜, 张志才, 容丽, 束龙仓, 阎长虹, 苏维词, 石朋. 西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [20] Rong L, Chen X, Chen X, Wang S, Du X. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of southwest China. *Hydrological Processes*, 25. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3666-3675.
- [21] Morison J I L, Baker N R, Mullineaux P M, Davies WJ. Improving water use in crop production[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 639-658.
- [22] Cai L, Chen X, Huang R, Smettem K. Runoff change induced by vegetation recovery and climate change over carbonate and non-carbonate areas in the karst region of South-west China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127231.
- [23] Ding Z, Liu Y, Wang L, Chen Y, Tang X. Effects and implications of ecological restoration projects on ecosystem water use efficiency in the karst region of Southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 170(2): 1-9.
- [24] 余新晓, 武显鑫, 贾国栋. 森林植被不同尺度的碳水过程及耦合机制研究进展[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 1-13.
- YU Xinxiao, WU Yuxin, JIA Guodong. Research progress of Carbon-Water processes and coupling mechanisms of forest vegetation at different scales[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 1-13.
- [25] Comstock J P. Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(367): 195-200.
- [26] Meinzer F C. Co - ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 265-274.
- [27] Sperry J S, Hacke U G, Oren R, Comstock J. P. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply[J]. *Plant, cell & environment*, 2002, 25(2): 251-263.
- [28] Dai Y, Dickinson R E, Wang Y P. A Two-Big-Leaf Model for Canopy Temperature, Photosynthesis, and Stomatal Conductance[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2281-2299.
- [29] 曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 席海洋, 卓玛措. 植物水分利用效率研究方法综述[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 853-858.
- CAO Shengkui, FENG Qi, SI Jianhua, CHANG Zongqiang, XI Haiyang, Zhuomacuo. Summary on research methods of water use efficiency in plant[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 853-858.
- [30] 沈芳芳, 樊后保, 吴建平, 刘文飞, 雷学明, 雷学臣. 植物叶片水平 $\delta^{13}\text{C}$ 与水分利用效率的研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(11): 114-124.
- SHEN Fangfang, FAN Houbao, WU Jianping, LIU Wenfei, LEI Xueming, LEI Xuechen. Review on carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and its relationship with water use efficiency at leaf level[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(11): 114-124.
- [31] 姜寒冰, 张玉翠, 任晓东, 要家威, 沈彦俊. 作物水分利用效率研究方法及其尺度传递研究进展[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27(1): 50-59.
- JIANG Hanbing, ZHANG Yucui, REN Xiaodong, YAO Jiawei, SHEN Yanjun. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 50-59.
- [32] Gregg P J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [33] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, Parnell A C, Semmens B X. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models [J]. *PeerJ*, 2018, 6(4).
- [34] Wu Z, Behzad H M, He Q, Wu C, Bai Y, Jiang Y. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone karst area, southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126199.
- [35] 李周, 赵雅洁, 宋海燕, 张静, 陶建平, 刘锦春. 喀斯特土层厚度异质性对草地群落结构和优势种生长的影响[J]. *草业科学*, 2017, 11(10): 2023-2032.
- LI Zhou, ZHAO Yajie, SONG Haiyan, ZHANG Jing, TAO Jian-

- ping, LIU Jinchun. The effects of soil thickness heterogeneity on grassland plant community structure and growth of dominant species in karst area[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 11(10): 2023-2032.
- [36] Estrada-Medina H, Querejeta I, Allen M, Graham R, Jimenez-Osornio J. Karst features and plant water sources in Yucatan, Mexico[C]//AGUSpringMeetingAbstracts.2008,2007:H34A-06.
- [37] Moreno-Gutiérrez C, Dawson T E, Nicolás E, Querejeta J I. Isotopes reveal contrasting water use strategies among coexisting plant species in a Mediterranean ecosystem[J]. *New Phytol*, 2012, 196(2): 489-496.
- [38] Barbata A, Peñuelas J. Sequence of plant responses to droughts of different timescales: lessons from holm oak (*Quercus ilex*) forests[J]. *Transactions of the Botanical Society of Edinburgh*, 2016, 9(4): 321-338.
- [39] Rumman R, Atkin O K, Bloomfield K J, Eamus D. Variation in bulk - leaf ^{13}C discrimination, leaf traits and water - use efficiency-trait relationships along a continental - scale climate gradient in Australia[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1186-1200.
- [40] 吕仕洪, 李象钦, 白坤栋, 韦春强, 曾丹娟, 徐广平. 石漠化区先锋树种对青冈幼苗的保育作用及枝叶性状的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 1917-1924.
- LYUSHihong, LI Xiangqin, BAI Kundong, WEI Chunqiang, ZENG Danjuan, XU Guangping. The effects of three pioneer tree species on facilitation and twig and leaf traits of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings in a rocky desertification region of Guangxi, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 1917-1924.
- [41] Wang T, Sun S, Yin Y, Zhao J, Tang Y, Wang Y, Gao F, Luan X. Status of crop water use efficiency evaluation methods: A review [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024: 349.
- [42] Gulias J, Seddaiu G, Cifre J, Salis M, Ledda L. Leaf and Plant Water Use Efficiency in Cocksfoot and Tall Fescue Accessions under Differing Soil Water Availability[J]. *CROP SCI*, 2012, 52(5): 2321-2331.
- [43] 路伟伟, 余新晓, 贾国栋, 李瀚之. 基于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的北京山区油松水分利用效率[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2093-2100.
- LU Weiwei, YU Xinxiao, JIA Guodong, LI Hanzhi. Variation characteristics of long-term water use efficiency based on tree-ring carbon isotope discrimination[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2093-2100.
- [44] Weiwei LU, Xinxiao YU, Guodong JIA, Ziqiang LIU. Responses of Intrinsic Water-use Efficiency and Tree Growth to Climate Change in Semi-Arid Areas of North China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 308.
- [45] 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 莫愁, 任艳, 陆汉芝, 秦会斌. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化 [J]. *地球与环境*, 2021, 49(1): 25-31.
- ZHANG Guiling, LI Yanqin, LUO Xuqiang, MO Chou, REN Yan, LU Hanzhi, QIN Huibinet. Change of Water Use Efficiency of Different Species in Karst Secondary Forest under Seasonal Drought [J]. *Earth and Environment* 2021, 49(1): 25-31.
- [46] 卢玲, 李新, 黄春林, Frank Veroustraete. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777-784.
- LU Ling, LI Xin, HUANG Chunlin, Frank Veroustraete. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation in West China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5): 777-784.
- [47] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 1-6.
- Daoxian Y. CARBON CYCLE AND GLOBAL KARST[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(1): 1-6.
- [48] Gao Q, Tao Z, Huang X, Nan L, Yu K, Wang Z. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Xijiang River basin, South China[J]. *Geomorphology*, 2009, 106(3-4): 324-332.
- [49] Kang Z Q, Yuan D X, Chang Y, Li QY, Xiong Z B. The main controlling factor of karst carbon sequestration: about water cycle[J]. *Journal of Jilin University*, 2011, 41(5): 1542-1547.
- [50] AMC, BMR. History of forest hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2-4): 189-216.
- [51] Goddérés Y, Brantley S L, François L M, Schott J, Pollard D, Déqué M, Dury M. Rates of consumption of atmospheric CO_2 through the weathering of loess during the next 100 yr of climate change[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(1): 135-148.
- [52] Zhao H, Jiang Y, Xiao Q, Zhang C, Behzad H M. Coupled carbon-nitrogen cycling controls the transformation of dissolved inorganic carbon into dissolved organic carbon in karst aquatic systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592(1): 1-12.
- [53] 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣. 陆地水-碳耦合模拟研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3187-3196.
- LIU Ning, SUN Pengsen, LIU Shirong. Research advances in simulating land water-carbon coupling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3187-3196.
- [54] Xiao J F, Sun G, Chen J, Chen H, Chen S, Dong G, Gao S, Guo H, Guo J, Han S. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013(182): 76-90.
- [55] 段凯, 孙阁, 刘宁. 变化环境下流域水—碳平衡演化研究综述[J]. *水利学报*, 2021, 52(3): 300-309.
- DUAN Kai, SUN Ge, LIU Ning. A review of research on watershed water-carbon balance evolution in a changing environment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(3): 300-309.
- [56] 孙桂凯, 黄瑞, 王国帅, 王熙财, 马龙, 王蕾, 莫崇勋. 2001–2018 年西江流域水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 327-335.
- SUN Guikai, HUANG Rui, WANG Guoshuai, WANG Xicai, MA Long, WANG Lei, MO Chongxun. Spatiotemporal variation of water use efficiency and its influencing factors in xijiang river basin from 2001 to 2018[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 327-335.
- [57] 于贵瑞, 王秋凤, 于振良. 陆地生态系统水—碳耦合循环与过

- 程管理研究[J]. *地球科学进展*, 2004(5): 831-839.
- [58] Black J R W L. Range fertilization: plant response and water use[J]. *Journal of Range Management*, 1979, 32(5): 345-349.
- [59] Xiaojuan Huang, Jingfeng Xiao, Mingguo Ma. Evaluating the performance of satellite-derived vegetation indices for estimating gross primary productivity using FLUXNET observations across the globe[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1-22.
- [60] Hong J, Kim J. Impact of the Asian monsoon climate on ecosystem carbon and water exchanges: a wavelet analysis and its ecosystem modeling implications[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1900-1916.
- [61] 马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 孟晨, 倪细炉. 基于CiteSpace的陆地生态系统碳水耦合研究现状及趋势[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5441-5449.
- MA Longlong, DU Lingtong, DAN Yang, WANG Le, QIAO Chenglong, MENG Chen, NI Xilu. Current status and future trends for carbon and water coupling of terrestrial ecosystem based on CiteSpace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5441-5449.
- [62] 赵阳, 曹文洪, 谢刚, 成晨, 殷小琳, 刘冰, 张晓明. 黄土丘陵区小流域土地覆被变化对径流产沙量的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 2111-2117.
- ZHAO Yang, CAO Wenhong, XIE Gang, CHENG Chen, YIN Xiaolin, LIU Bing, ZHANG Xiaoming. Effect of land cover change on runoff and sediment yield of small watershed in Loess Hilly-gully region[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 2111-2117.
- [63] Fu Z, Stoy P C, Luo Y, Chen J, Niu S. Climate controls over the net carbon uptake period and amplitude of net ecosystem production in temperate and boreal ecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 9-18.
- [64] 刘鑫, 李思亮, 岳甫均, 钟君, 覃蔡清, 丁虎. 喀斯特系统生物地球化学循环及对全球变化的响应[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 465-476.
- LIU Xin, LI Siliang, YUE Fujun, ZHONG Jun, QIN Caiqing, DING Hu. Biogeochemical cycles of karst systems and their response to global change[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 465-476.
- [65] Littell J S, Peterson D L, Riley K L, Liu Y, Luce C H. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(7): 2353-2369.
- [66] Yang Y, Guan H, Batelaan O, Mcvillar TR, Di L, Piao S, Wei L, Bing L, Zhao J, Simmons C T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1-8.
- [67] 王发, 聂云鹏, 陈洪松, 付智勇, 连晋姣. 典型喀斯特白云岩小流域土壤-表层岩溶带厚度空间异质性特征[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(1): 306-314.
- WANG Fa, NIE Yunpeng, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, LIAN Jinjiao. Spatial heterogeneity characteristics of soil-epikarst thickness in a typical karst dolomite small watershed[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(1): 306-314.
- [68] Wu Y, Liu S, Qiu L, Sun Y. SWAT-DayCent coupler: An integration tool for simultaneous hydro-biogeochemical modeling using SWAT and DayCent[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 86(dec.): 81-90.
- [69] Zhao F, Wu Y, Sivakumar B, Long A, Qiu L, Chen J, Wang L, Liu S, Hu H. Climatic and hydrologic controls on net primary production in a semiarid loess watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 803-815.
- [70] Luo P, Kang S, Apip, Zhou M, Nover D. Water quality trend assessment in Jakarta: A rapidly growing Asian megacity [J]. *PLoS ONE* 14(7): e0219009.
- [71] 孙美荣, 张维诚. 森林生态学研究进展-气候变化下的森林碳水耦合[J]. *林业和草原机械*, 2021(6): 38-41, 26.
- SUN Meirong, ZHANG Weicheng. Advances in forest ecology: forest carbon-water coupling under climate change[J]. *Forestry and Grassland Machinery*, 2021(6): 38-41, 26.
- [72] Wang K, Zhang C, Chen H, Yue Y, Zhang W, Zhang M, Qi X, Fu Z. Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services[J]. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2743-2763.
- [73] Tong X, Wang K, Yue Y, Brandt M, Liu B, Zhang C, Liao C, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [74] Sun H, Bai Y, Lu M, Wang J, Tuo Y, Yan D, Zhang W. Drivers of the water use efficiency changes in China during 1982-2015[J]. *The Science of the total environment*, 2021, 799: 145-149.
- [75] 肖霜霜, 陈武荣, 傅伟, 张建兵. 土地利用方式对喀斯特土壤微生物资源限制的影响[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(5): 1065-1075.
- XIAO Shuangshuang, CHEN Wurong, FU Wei, ZHANG Jianbing. Effects of land use patterns on the limitation of soil microbial resources in the karst areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(5): 1065-1075.
- [76] 陶波, 葛全胜, 李克让, 邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展[J]. *地理研究*, 2001, 20(5): 564-575.
- TAO Bo, GE Quansheng, LI Kerang, SHAO Xuemei. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(5): 564-575.
- [77] Andrews J A, Schlesinger W H. Soil CO₂ dynamics, acidification, and chemical weathering in a temperate forest with experimental CO₂ enrichment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 149-162.
- [78] Ahearn D S, Sheibley R W, Dahlgren R A, Anderson M, Johnson J, Tate K W. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3-4): 234-247.

- [79] 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(2): 153-163.
ZENG Si-bo, JIANG Yong-jun. Impact of Land-Use and Land-Cover change on the carbon sink produced by karst processes: A review[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(2): 153-163.
- [80] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 89(1): 78-85.
- [81] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, le Maitre D C, McCarl Bruce A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration.[J]. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [82] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Drivers of land use/land cover changes in Munessa-Shashemene landscape of the south-central highlands of Ethiopia[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2015, 187: 1-17.
- [83] 李青松, 苏维词, 吕思思. 基于“源-汇”理念的黔中“两湖一库”地区土地利用变化及驱动力分析[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 928-939.
LI Qingsong, SU Weici, LYU Sisi. Analysis of land use changes and their driving force in "Two Lakes and One Reservoir" area of central Guizhou Province based on the concepts of "Source and Sink"[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 928-939.
- [84] 任惠敏, 付智勇, 王发, 陈洪松. 喀斯特坡地不同土地利用方式碳氮流失的水文驱动特征[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 84-93.
REN Huimin, FU Zhiyong, WANG Fa, CHEN Hongsong. Hydrological driving characteristics of soil carbon and nitrogen losses under different land use modes on karst slopes[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 84-93.
- [85] 郑炜, 杨保, 徐宗永, 肖羚. 隧道建设活动对地表植被群落动态的影响: 以武昆高速公路象鼻岭隧道为例[J]. *公路交通技术*, 2012(5): 145-149.
ZHENG Wei, YANG Bao, XU Zongyong, XIAO Ling. Influences of Tunnel Construction Activities on Tendencies of Surface Vegetational Types: With Xiangbiling Tunnel on Wuding-Kunming Expressway as an Example[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2012(5): 145-149.
- [86] 吴超, 蒋勇军, 沈立成, 刘九缠, 何瑞亮. 喀斯特槽谷典型植物水分利用效率对隧道建设的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 4032-4040.
WU Chao, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, LIU Jiuchan, HE Ruiliang. Response of water use efficiency of typical plants to tunnel construction in karst trough valley[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4032-4040.
- [87] Li J, Hong A, Yuan D, Jiang Y, Deng S, Cao C, Liu J. A new distributed karst-tunnel hydrological model and tunnel hydrological effect simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 1-17.
- [88] Zheng X, Yang Z, Wang S, Chen Y, Hu R, Zhao X, Wu X, Yang X. Evaluation of hydrogeological impact of tunnel engineering in a karst aquifer by coupled discrete-continuum numerical simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 125765.
- [89] Pan Z, Yang S, Lou H, Gong J, Zhou B, Wang H, Li H, Li J, Dai Y, Yi Y, Gao C, Huang X. Small reservoirs can enhance the terrestrial carbon sink of controlled basins in karst areas worldwide[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 951: 175517.
- [90] Wang W, Li S, Zhong J, Slowinski S, Li S, Li C, Su J, Yi Y, Dong K, Xu S, Van Cappellen P, Liu C. Carbonate mineral dissolution and photosynthesis-induced precipitation regulate inorganic carbon cycling along the karst river-reservoir continuum, SW China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128621.
- [91] Yin B, Guan D, Zhou L, Zhou J, He X. Sensitivity assessment and simulation of water resource security in karst areas within the context of hydroclimate change[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120994.

Research progress on the water-carbon coupling processes at different scales in karst regions

ZHANG Jianchun^{1,2}, ZHU Jiang^{1,2}, HE Changde^{1,2}, JIA Zhi^{1,2}, ZHU Lifei^{1,2}, YI Yin^{2,3}, GONG Jiyi^{1,3}

(1. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest Karst Mountains, Guizhou Normal University, National Forestry and Grassland Administration, Guiyang, Guizhou 550025, China;

3. Engineering Research Center for Carbon Neutrality in Karst Areas, Guizhou Normal University, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract Karst regions are characterized by exposed bedrock, poor soils, and severe soil erosion, leading to a fragile and sensitive ecological environment, making them a key region for global environmental change research. The water cycle and carbon cycle are two key processes within ecosystems. The water cycle serves as a crucial material foundation for maintaining ecosystem stability and acts as an important vehicle for material circulation. In contrast, the carbon cycle represents a significant aspect of energy flow and material circulation. The interplay between these cycles is vital for sustaining ecosystem functions and environmental effects. In karst regions, the hydrological processes are complex, and the ecological environment is vulnerable. The water-carbon coupling is affected by natural and human

factors, hence, studying the coupling process of karst region is essential for exploring the ecosystem in this area. Although considerable researches have been conducted on water-carbon coupling processes in karst areas, there remains a lack of systematic induction and summary of existing scientific findings, and future research directions need to be clearly guided and sorted. Thus, a comprehensive review and analysis of the water-carbon coupling processes in karst regions is particularly necessary.

This study firstly starts from different spatial scales, from the leaf-scale level to the regional-scale level, to reveal the coupling mechanism between the water cycle and the carbon cycle. Combining the topographical and geomorphic characteristics of karst areas, the regional water - carbon coupling research of which is expanded from the Soil -Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC) to the Soil-Rock-Plant-Atmosphere-Continuum (SRPAC). The Water Use Efficiency (WUE) is a key indicator for measuring water-carbon exchange, which is affected by the factors such as unique topography, vegetation, and etc., showing significant differences from the non-karst areas. At the leaf-scale, stomatal behavior regulates photosynthesis and transpiration, affecting the plant's water-use strategy. At the plant scale, the water-carbon utilization of vegetation exhibits topographic variations, with WUE being constrained by factors such as soil moisture. At the ecosystem scale, water-carbon coupling correlates with hydro-thermal environment and CO₂ concentrations, while the groundwater circulation drives the carbon cycling process. At the regional scale, water-carbon coupling manifests through the relationship between vegetation carbon sequestration and runoff generation and confluence, showing the exploration of the spatial-temporal distribution of WUE is of great significance for rocky desertification control.

Secondly, an analysis is carried out from multiple perspectives such as climate change, vegetation restoration, land-use change, and engineering measures to summarize the impacts of natural and human activities on the water-carbon coupling processes. Climate change leads to fluctuations in precipitation patterns and temperature, directly altering the path and intensity of the water cycle, and thus affecting the carbon cycle. Vegetation restoration indirectly affects water-carbon coupling by regulating the regional climate and hydrology through soil and water conservation by roots and increasing vegetation coverage. Land-use change profoundly affects the water-carbon cycle process by influencing the carbon cycle and water resource distribution through changes in soil and runoff. Various engineering measures, such as the construction of water conservancy facilities, soil-water conservation projects, and tunnel construction, also have a significant impact on water-carbon coupling processes.

Finally, potential future research hot spots are sorted out and extended classification methods of water-carbon coupling in combination with the karst geological background are proposed in this paper. It is suggested that a comprehensive monitoring system should be established, various carbon sink studies be integrated, and an interdisciplinary approach be adopted to carry out the simulation and prediction research on water-carbon coupling process in karst areas. The water-carbon coupling model should be improved, and the spatial-temporal resolution of data should be enhanced. In-depth research on the impacts of climate change and various human activities on the water-carbon coupling process in karst areas should be conducted in multiple directions. This study provides a new perspective for future research on water-carbon balance in karst areas and shows positive significances for the scientific formulation of water resource and carbon balance management policies in karst regions.

Key words karst, water cycle, carbon cycle, water-carbon coupling, Water Use Efficiency(WUE)

(编辑 杨杨)