

刘鑫, 李思亮, 岳甫均, 等. 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.

DOI: 10.11932/karst20220313

喀斯特系统生物地球化学循环及对全球变化的响应

刘 鑫¹, 李思亮¹, 岳甫均¹, 钟 君¹, 覃蔡清², 丁 虎¹

(1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要:生物地球化学循环是地球系统物质循环的核心, 是维系地表生态系统稳定和人类社会可持续发展的重要基础。然而, 气候变化以及人类的过度干扰可能会显著改变表层地球系统中的生物地球化学循环过程, 尤其是脆弱的喀斯特生态系统。特殊的多孔隙关键带结构也加速了喀斯特地区物质循环及其对外界环境变化的响应, 影响了不同尺度的物质循环和生物地球化学过程。本研究主要综述了宏观尺度(气候变化)、中尺度(人类活动)和微观尺度(微生物活动)的环境变化对喀斯特地区生物地球化学循环的影响。结果表明多要素变化导致喀斯特地区物质循环受到强烈影响, 气候变化、人类活动和微生物活动及其耦合关系对喀斯特地区生物地球化学循环的调控作用具有重要意义。最后, 本研究强调了现有研究的局限性并指出未来研究的挑战与方向, 即未来应从系统研究(如地球关键带)的视角出发, 将多尺度观测—分析与综合模型集成研究并举, 从而构建多源多尺度耦合的过程和系统模型, 进而为阐明喀斯特系统的演变规律和动力学机制、实现喀斯特地区的生态保护和高质量发展提供理论基础。

关键词:喀斯特系统; 气候变化; 人类活动; 微生物活动; 生物地球化学循环

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 03-0465-12 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引 言

生物地球化学循环是表层地球系统运转的重要组成部分, 关联着物质、能量和信息在各圈层之间流转和维持, 对于维系地球系统稳定具有重要意义^[1-2]。全球变化通过影响生物地球化学循环, 控制了全球生态系统功能, 从而影响了地球系统的稳定, 同时系统不同状态又会对系统演变和全球变化有反馈作用(图1)。物质组成中最为关键的碳、氮、磷、硫(C、N、P、S)等元素是重要的生源要素, 也是全球物质循环的核心, 而其中又以碳循环最为关键, 氮、磷、硫对碳循环有强耦合关系。全球变化深刻改变了地球岩

石圈—土壤圈—水圈—生物圈—大气圈之间的相互作用, 进而影响了全球生态系统稳定和人类社会可持续发展^[3-4]。因此, 揭示宏观尺度的气候变化、中尺度的人类活动以及微观尺度的微生物活动对全球变化的响应规律与机制具有重要意义。

区域对全球变化的响应和适应机制, 是当前关于全球变化的核心内容^[5]。处于人类发展新阶段, 对全球变化背景下区域生态系统响应的研究主要应从气候变化(气候变暖和降水异常)、人类活动(土地利用变化、城镇化和水利工程)以及微生物活动着手, 并评估在未来不同气候和人类活动情景模式下对关键带系统和生态系统的深层次影响。毫无疑问, 全

基金项目: 中国科学院战略重点研究项目(XDB40000000); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(41925002)

第一作者简介: 刘鑫(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域生物地球化学循环。E-mail: Liuxin_213@tju.edu.cn。

通信作者: 李思亮(1978—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事流域生物地球化学方面研究工作。E-mail: Siliang.li@tju.edu.cn。

收稿日期: 2022-03-30

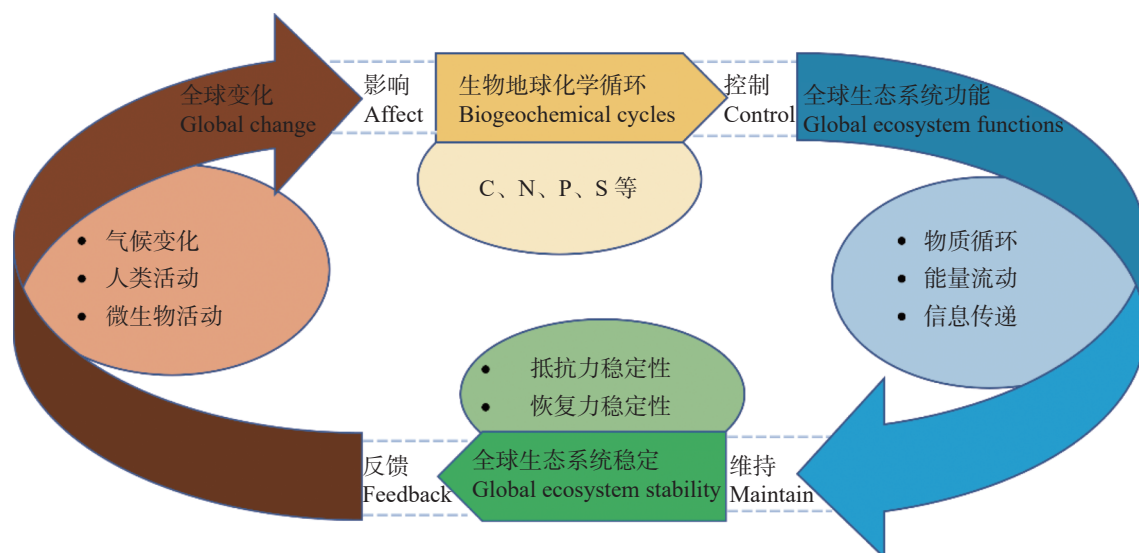


图1 生物地球化学循环对全球变化响应的概念模型。

Fig. 1 Conceptual model showing the response of biogeochemical cycle to global change

球变化背景下的生物地球化学循环过程受到了显著的影响,尤其是生态环境脆弱敏感性地区,如喀斯特地区^[2,5]。因此,加深区域尺度对全球变化响应的研究不仅有助于为未来区域发展提供科学依据并对于实现可持续发展具有重要意义。

全球喀斯特地区约占地球无冰陆地的15%,是地球表层系统的重要组成部分^[6]。喀斯特地区具有独特的地貌、水文特征和地质构造,主要受碳酸盐岩溶蚀动力学控制^[7]。作为长江流域上游的生态安全屏障,喀斯特地区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,使得农业发展和环境保护之间面临巨大挑战^[8-9]。因此,探究在全球变化背景下喀斯特地区的生物地球化学循环响应机制,对于该地区生态保护和高质量发展具有重要意义。

1 气候变化下的喀斯特地区生物地球化学循环

气候变化(主要包括气候变暖和降水异常)是全球变化最直接的表现,作为宏观尺度上的全球变化,不仅对喀斯特地区生态系统的稳定具有决定性作用,也对当地生物地球化学过程和物质循环有着巨大的影响。

1.1 气候变暖

气候变暖通过改变关键元素的循环过程,影响

了生态系统的初级生产力^[10]。气候变暖最直观的表现是导致具有丰富碳储存的冰川、冻土融化,极大的改变了全球碳循环过程。Zeng等^[11]通过对高山岩溶地区两个水文年高分辨监测发现,全球变暖导致地表径流增加,进而引起碳汇增加,能够在一定程度上抵消人为增加的大气CO₂,但如果冰川持续退缩甚至消失将会大大降低调控效果。其次,气候变暖也会影响改变岩石风化速率,进而影响全球碳汇通量。Zhong等^[12]通过对中国季风河流的浓度-径流(C-q)关系研究发现,中国季风河流的风化通量对气候的依赖性高于全球大多数河流,而且对气候变化的敏感性(4.4%/℃)也远高于全球平均水平(3.6%/℃)。同时,Zeng等^[13]通过对未来不同气候情景模拟发现,气候变暖背景下全球碳酸盐岩风化碳汇通量在本世纪可能将增加9.8%到17.1%。此外,气候变暖还会导致河流水生光合作用增强,从而影响流域碳循环过程^[14]。Chen等^[15]通过对西南喀斯特和非喀斯特河流研究发现,气候变暖通过增强水生植物光合作用增加河流颗粒物有机碳进而增强了流域碳汇作用。尽管气候变暖在一定程度上可能会增强喀斯特地区水生生态系统碳汇功能,但却会导致流域碳汇效应随着变暖程度的增加而降低。因此,未来应采取有效措施遏制气候变暖,并建立反馈机制以应对气候变暖带来的负面影响。

具有脆弱生态系统的喀斯特地区,植被一旦被破坏,将会影响全球碳、氮循环及生态系统生产力并造成严重石漠化^[5]。而气候变暖导致火灾发生频率

增加,将严重威胁喀斯特地区生态系统稳定。张喜等^[16]研究发现林火不仅会在短时间内显著减少喀斯特山区林地的生物量,而且会对植物—土壤系统的生物地球化学过程和化学计量特征产生长时间影响,如营养物质返还生态系统加速系统的恢复。此外,尽管生态系统对极端气候有一定缓冲能力,但也会降低生态系统碳氮储量。伍方骥等^[17]研究表明极端气候事件会显著降低喀斯特洼地土壤中的碳氮储量。因此,尽量避免和减轻火灾和极端气候对喀斯特生态脆弱区的影响,对于当地生态系统的恢复和重建具有重要意义。

值得注意的是,气候变暖还会影响土壤呼吸作用,进而影响生态系统碳通量。Fang等^[18]研究表明气候变暖使得土壤总呼吸和异养呼吸分别降低了7.4%和9.5%,但对自养呼吸并没有显著影响。而唐国勇等^[19]在喀斯特地区模拟升温的实验中发现,升温样地的土壤CO₂通量较对照组提高了17.41%。可以发现土壤呼吸对气候变暖的响应机制目前尚未有定论,可能是由于相应生物和非生物机制以及土壤呼吸各组分的敏感性差异造成的^[20]。气候变暖能够通过提高生物因素(如地下根系生理活性)和非生物

因素(如酶活性)直接或间接的促进土壤呼吸,但能否抵消由于土壤水分含量降低等因素引起的土壤呼吸减弱的后果应作为未来研究重点。

1.2 降水异常

气候变暖加快了全球水循环过程并改变了降水特征,导致年际降水改变以及极端降水频发。降水异常(降水减少和极端降水)破坏了物质循环的原有平衡过程,对喀斯特地区生态系统具有重要影响(图2)。首先,降水异常通过影响植物多样性和丰富度,进而影响了陆地生态系统净初级生产力^[21]。Zhang等^[22]研究表明,干旱通过降低土壤含水量和土壤无机氮浓度限制了植物生产,最终导致生态系统的净初级生产力显著降低。同时,Xu等^[23]研究表明降水增多能够显著增加地下根系生物量从而加大对土壤碳氮的吸收,进而加速生态系统中的碳氮循环,但同时也可能会加大了土壤碳氮流失风险。贵州作为世界上最典型的喀斯特地区,自1960—2019年以来年降水量呈减少趋势,干旱和极端降水事件时有发生,这必将对当地植物群落更替、农业发展以及生态环境造成重要的影响^[24]。

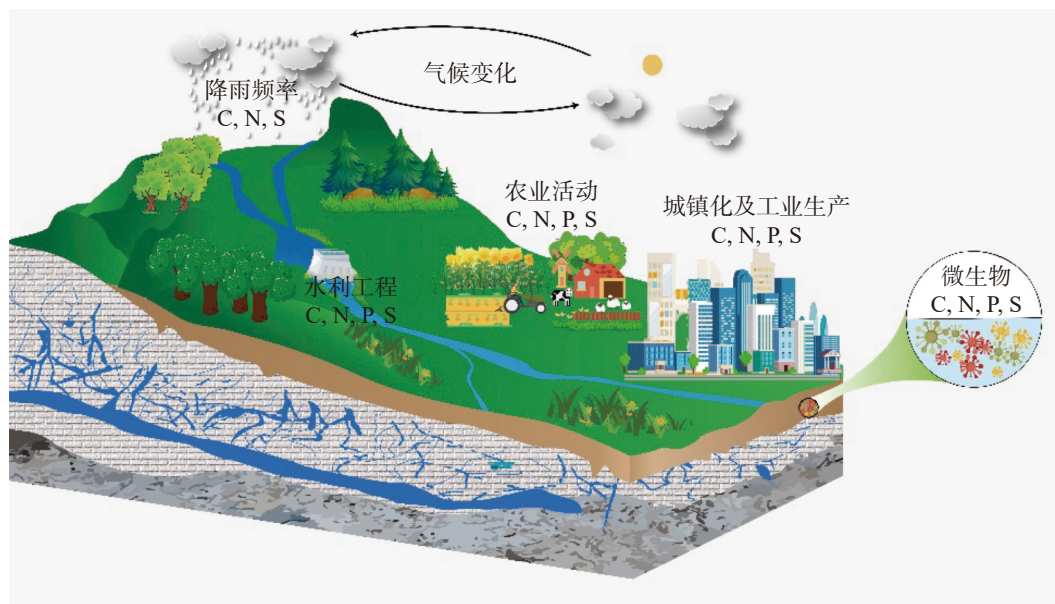


图2 全球变化对喀斯特地区生物地球化学循环的影响概念图。

Fig. 2 Conceptual diagram showing the effects of global change on biogeochemical cycles in the karst regions

降水异常也会显著影响喀斯特地区土壤呼吸,进而影响碳循环过程。蒿廉伊等^[25]通过野外控制实验发现,降水增多导致草原土壤呼吸呈增加的趋势,而且降水变化会对土壤呼吸强度产生遗留效应。同

时,吕文强等^[26]也发现喀斯特地区城市绿地土壤的呼吸速率在不同强度降水下具有显著差异,强降水后的土壤呼吸速率显著大于中雨和晴天。由于喀斯特地区土层薄且面临严重的石漠化,因此,降水异常

对该地区土壤呼吸将有更为显著的影响。

此外,降水异常还将改变流域中的营养物质通量,对水生生态系统安全有重要影响。Yue 等^[27]发现强降水会加剧硝酸盐流向水体,从而增加了喀斯特地区的水质污染风险。由于喀斯特地区流域水体的 HCO_3^- 浓度远高于非喀斯特地区,降水增多引起径流增加将显著影响流域碳循环过程^[28]。Li 等^[29]在通过对桂林朝天河研究发现,喀斯特河流水体的 HCO_3^- 浓度约为非喀斯特地区的 10 倍,异源水增加将显著增加河流碳汇。而且,流量增加还将加速流域的风化过程。Zhong 等^[30]在西江流域研究发现,河流流量增加会加快流域的风化速率,进而引起 CO_2 消耗通量增加。值得注意的是,气温和降水往往是耦合的,单因素分析可能无法全面评估气候变化对生物地球化学循环的影响。因此,未来应结合室内和野外控制实验,以期综合评估气候变化对喀斯特地区生物地球化学循环的影响以及对生态系统稳定的反馈。

2 人类活动下的喀斯特地区生物地球化学循环

人类活动对地球系统造成前所未有的影响,极大地改变了全球气候和生物地球化学循环过程,形成了新的全球生物地理格局,以至于专门提出“人类世(Anthropocene)”的概念定义当前时代^[31]。随着人类活动的不断加剧,维持喀斯特地区生态系统稳定的生物地球化学循环以前所未有的速度改变,并将最终影响喀斯特地区物质的地理分配格局。作为中尺度的人类活动对喀斯特地区环境影响是多维度的,尤以土地利用变化、城镇化以及水利工程等对物质循环影响最大。

2.1 喀斯特地区土地利用变化

土地利用和植被覆盖的变化改变了生态系统结构和功能,进而深刻影响了喀斯特地区生物地球化学循环过程^[32]。土地覆盖程度减少将增加土壤侵蚀及石漠化发生频率,从而加剧土壤中营养物质损失。喀斯特地区作为我国典型的石漠化生态脆弱区,面临严重的水土流失风险,土壤侵蚀引起的土壤养分流失/渗漏是喀斯特地区生态环境退化的主要原因。Zeng 等^[33]基于 GIS 技术和 RUSLE 模型研究发现,喀斯特地区土壤侵蚀的空间分布决定了土壤养分流

失的空间分布。因此,增加喀斯特地区植被覆盖度不仅能够减少水土流失,也能促进土壤有机物质累积,是治理喀斯特石漠化关键的手段之一。

为实现喀斯特地区生态保护和高质量发展,本世纪初国家在喀斯特地区推行了退耕还林还草、石漠化修复工程和天然林保护工程,使得喀斯特地区地表覆盖发生了巨大变化,大部分退化土地恢复为林地和灌丛^[34]。Liu 等^[35]发现生态系统植被恢复有助于土壤中碳氮积累,但植被恢复过程中的土壤碳氮耦合可能受到土壤固氮能力不足的制约。同时,Zhu 等^[34]研究发现磷限制了喀斯特地区植被对氮的利用,进而限制了对碳的吸收。因此,要恢复喀斯特地区退化的生态系统可能需要在植被恢复早期增加土壤氮磷的输入。此外,喀斯特地区土壤碳氮的来源和转化受不同土地利用方式的影响较大,不同土地利用方式下的土壤碳氮储量有所差异。Liu 等^[36]研究表明与非农业用地相比,农业活动降低了喀斯特地区农田全土层土壤有机碳和土壤有机氮的储量。而且 Knops 等^[37]通过对 1 900 个永久样地 12 年观测发现,在撂荒期农业耕作将导致土壤碳氮分别损失了 89% 和 75%。因此,减少喀斯特地区农业耕种将在促进当地土壤碳氮累积以及维持生态系统稳定中发挥重要作用。

值得注意的是,土地利用转换也会显著改变喀斯特地区生态系统的营养物质循环过程。森林是世界上最大的有机氮库,其丰富的微生物种类和数量以及有机质含量,对于维持森林生态系统的可持续发展具有重要意义^[38],而林地转换为草地和农地后,土壤养分及微生物种类和数量会迅速减少,从而引起土壤退化等一系列后果。Jiang 等^[39]在云南典型喀斯特农业区研究发现,林地转化为耕地后土壤中的有机质和全氮含量将会显著降低。尽管喀斯特地区天然用地的占比变化不大(图 3),但我国喀斯特地区石漠化面积逐年下降,表明石漠化扩展趋势得到了有效遏制,生态环境在不断转好,未来继续推行有效的生态修复治理措施具有重要意义。

2.2 喀斯特地区城镇化

随着人与自然的相互作用加剧,人类已经成为影响环境演化的重要因素。城市作为现代文明的标志,近代以来其扩张速度大大加快,城镇人口由 1950 年的 30% 提升到了 2019 年的 56%,全球城市区域约占

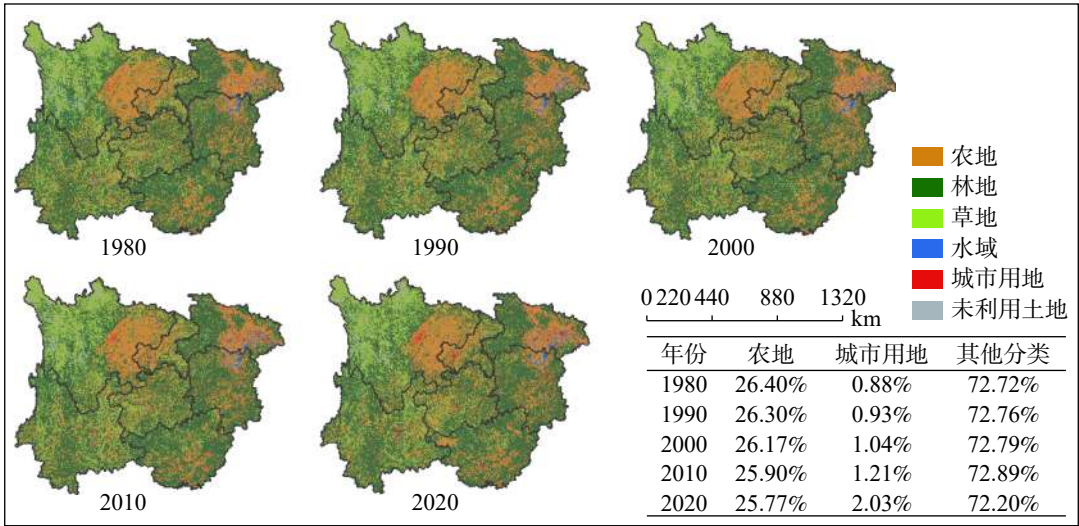


图 3 中国南方喀斯特地区 1980~2020 年间不同土地利用变化.数据来源于 <https://www.resdc.cn>.

Fig. 3 Land use changes of karst regions in the south China from 1980 to 2020.(The data was provided by <https://www.resdc.cn>)

陆地面积的 2.4%^[40]。不断扩张的城市面积以及持续增加的人口直接或间接的改变了城市生态系统结构和功能,并深刻影响了全球生物地球化学循环平衡^[41]。如图 3 所示,我国喀斯特地区城市占地从 1980 年的 0.88% 增长到 2020 年的 2.03%,尤其在近 10 年城市面积几乎翻了一番。城镇化过程中不仅会消耗大量能源还会显著增加大气碳排放,研究发现能源消耗产生的 CO₂ 排放量有 75% 发生在城市^[42],这极大的改变了全球碳循环过程。

根据我国主要城市系统近年来碳储量长时间变化特征可以发现^[42-44],无论是城市系统中的自然碳储量还是人为碳储量都显著增加。这表明城市土壤具有储存大量土壤有机碳(SOC)的潜力,对于缓解大气 CO₂ 浓度增加有重要意义,而且喀斯特地区城市流域平均碳汇速率($0.997 \times 10^6 \text{ mol km}^{-2} \text{ yr}$)也显著高于自然流域($0.358 \times 10^6 \text{ mol km}^{-2} \text{ yr}$)^[45]。然而,城镇化不仅对土壤的物理和化学性质以及生物过程有重要影响,而且深刻改变了土壤中的元素组成以及转化。Sun 等^[46]发现城市土壤有机碳储量和密度不仅在不同城市功能区之间存在明显的差异,并且城郊梯度差异十分显著。同时,Raciti 等^[47]研究表明,在城市不透水层下 0~15 cm 的土壤中碳和氮含量分别降低了 66% 和 95%。城市尺度的生物地球化学循环对地球表层元素组成有重要影响,作为生态脆弱的喀斯特地区,未来应构建城市—郊区—乡村生态系统的耦合体,通过实现资源的合理分配与共享,以期制定合适的环境管理政策并最终实现可持续发展目标。

2.3 喀斯特地区水利工程

人类大型工程对地球表面的改造极大地影响了生物地球化学循环过程,这已成为全球的普遍共识。河流作为陆地与海洋物质输送的重要桥梁,修建大坝和水库等水利工程极大地改变的陆地水循环过程,阻碍了多种营养物质沿着河网流动,进而影响陆地—河流—海洋的物质循环过程(图 2)^[48-49]。喀斯特地区具有丰富的水能资源,为缓解能源危机,大力建设水利工程将深刻改变喀斯特河流物质运移过程。颗粒物作为溶质的重要载体,水坝的修建拦截了大部分的颗粒物,将严重影响喀斯特地区河流生物地球化学循环过程。Eiriksdottir 等^[50]发现约 85% 的原始河流输送的颗粒物质被大坝截留,而大部分溶解元素的年通量由于流量减少,悬浮物质停留时间和溶解时间的增加却大幅度增加。同时,Wang 等^[51]发现筑坝导致长江流域向河口输入的陆源 POC(颗粒有机碳)降低了 90%,而不稳定的自源 POC 出口量却增加了 20 倍,自 2013 年以来长江流域已截留 $2.3 \pm 0.5 \text{ Mt C yr}^{-1}$ 的陆源 POC,强烈影响了河口的碳循环过程。因此,应该在未来研究工作中多关注水利工程对流域物质迁移过程的影响,以保障水生生态系统的动态稳定。

此外,筑坝也会显著影响喀斯特河流水体溶解无机碳(DIC)的地球化学行为。Wang 等^[52]对喀斯特地区乌江渡深水库研究发现,水体滞留时间是碳运移和生物地球化学过程的主控因素,其中约 71.5% 的 DIC 通量产生于 15 m 深度以下水体,筑坝

将显著增加深层水体的 DIC 浓度。同时, Wang 等^[53]对乌江流域多个水库研究发现, 水体剖面的 DIC 浓度主要受光合作用和呼吸作用共同调控, 呼吸作用以及底层泄水的水库水力发电方式等导致下游河流中 HCO_3^- 浓度显著高于上游, 而且梯级筑坝的方式又显著放大了 HCO_3^- 的累积效应。而且, 筑坝还会对水体营养物质运输及转化产生巨大影响。Akbarzadeh 等^[48]发现筑坝降低了河流总氮的通量, 结果显示 2000 年全球范围内水库固氮量约为 70 Gmol yr^{-1} , 而且水库的反硝化和埋藏作用消除了约 270 Gmol yr^{-1} , 约占全球河网氮负荷的 7%, 并预计到 2030 年将达到约 14%。因此, 深入探究修建水利工程对喀斯特地区流域营养物质通量的影响, 对于维持内陆河流生态安全以及近岸海洋环境稳定具有重要意义。

值得注意的是, 相比于非喀斯特地区, 喀斯特河流本就具有丰富的无机碳, 能够促进植物进行光合作用, 而筑坝进一步加速了流域风化速率导致水中无机碳含量增加。Gao 等^[54]对乌江流域多个大坝水库调查发现河流蓄水将显著改变流域风化速率, 水库蓄水时间越长将导致大坝上下游的风化速率差距越大。同时, Peng 等^[55]发现, 乌江流域筑坝后浮游植物生物活性增强导致水库地表水中叶绿素 a 含量显著高于上游, 进而极大的影响流域碳循环过程。因此, 未来修建水利工程时应该充分考虑对流域生态环境的影响, 并通过调节蓄留时间尽量削弱梯级水库的水坝效应。

3 喀斯特地区微生物对生物地球化学循环的影响

微生物通过代谢活动驱动生物地球化学循环, 并对不断变化的环境条件做出迅速反应以维持全球生态系统稳定^[56]。作为微观尺度上的生物活动, 微生物控制了生物圈中最大的有机质库周转^[57], 极大地影响了不同区域关键带中物质的生物地球化学循环。土壤微生物和土壤功能之间的相互作用, 不仅主导了许多物质循环过程, 而且在土壤的形成及其功能的维持中发挥了关键作用(图 2), 并对于防治土壤退化和促进土壤恢复具有决定性作用^[58], 尤其对于喀斯特地区石漠化治理具有重要意义。

作为地球表层的重要组成部分, 喀斯特生态系统广泛分布于全球各地, 在全球碳循环过程中发挥

了重要作用。相比于非喀斯特地区, 喀斯特地球关键带中土壤营养物的分布、积累和稳定机制有显著差异, 对微生物多样性和丰度有重要影响^[59]。张双双等^[60]通过对比喀斯特地区、混合区和非喀斯特地区的土壤细菌群落发现, 喀斯特地区较高的土壤有机碳积累能促进土壤微生物多样性和丰度。众所周知, 喀斯特地区面临严重的石漠化威胁, 这将严重影响微生物群落的稳定。Qiu 等^[61]在我国主要土壤侵蚀区发现, 水土侵蚀不仅会显著降低土壤多功能性, 而且会降低微生物群落的多样性和网络复杂性。值得注意的是, 研究发现苔藓生物结皮能够有效减缓喀斯特地区石漠化进程, 不仅能够有效保存土壤养分还能够显著增加土壤微生物的丰度^[62]。因此, 利用藓类的生物结皮可作为未来喀斯特地区石漠化治理的重要辅助手段。

全球变化导致生物多样性正在以前所未有的速度变化, 其中气候变化通过对喀斯特地区微生物群落结构和生物量的控制影响了生物地球化学循环过程, 进而对生态系统服务与功能有重要影响。Guo 等^[63]通过研究长期气候变化下草原生态系统中的土壤微生物发现, 气候变暖显著改变了微生物的群落结构, 将导致土壤微生物群落的演替日益多样化。值得注意的是, 土壤微生物对环境变化并非是渐进式的, 可能存在阈值效应, 超过 8.86°C 的年平均温度, 22.41°C 的土壤温度和 27.97°C 的最热月份最高温度的阈值, 土壤腐生真菌丰度将急剧下降, 这将对微生物驱动的生物地球化学循环造成重要影响^[64]。因此, 关注气候变化对微生物的影响对于维持喀斯特生态系统稳定具有重要意义。

此外, 养分添加也会影响喀斯特地区土壤微生物的功能多样性和群落结构, 显示出人为活动对表层地球系统缓慢而深远的影响。Stone 等^[65]发现尽管养分添加降低了细菌的功能多样性, 但能够通过更少的特定细菌群落增加碳通量, 而且参与呼吸作用的细菌类群在不同生态系统中存在显著差异, 特异性类群在调控土壤碳循环具有重要作用。因此, 加强对生物地球化学循环有关作用的特殊菌群研究, 不仅有助于喀斯特地区的生态修复, 而且对于生态系统碳封存也有重要意义。值得注意的是, 长期施肥不仅会显著改变喀斯特地区土壤剖面的碳、氮的有效性, 导致土壤微生物群落发生分化, 也会改变元素(如碳氮磷硫)之间的耦合关系。Zeng 等^[66]发

现施肥直接影响土壤细菌丰富度,并通过土壤酸化和植物群落变化间接影响细菌群落,表明施氮对土壤细菌多样性和群落组成有明显的控制作用。同时, Xu 等^[67]在西南喀斯特河流中发现减施氮肥和黄铁矿氧化不仅改变了碳、氮、硫的耦合关系,而且通过驱动陆地化学风化促进了全球碳循环。喀斯特地区作为我国主要的农业区,加上特殊地质构造,以往提高施肥量增加作物产量的方法可能对当地的微生物多样性和丰度有重要影响。因此,未来应该统筹协调当地农业发展和环境保护之间的关系,以期实现喀斯特地区生态保护和高质量发展。

4 未来研究展望

作为维持喀斯特地区生态系统稳定的关键,探究全球变化背景下的喀斯特系统生物地球化学过程和物质循环的响应具有重要意义。然而,尽管已经开展了大量研究并取得一些成果,但受限于理论认知和技术手段,对部分现象还存在较大分歧或认识不充分,甚至还有很多问题并未发现。基于此,我们认为未来还应从以下三个方面继续开展研究:

(1)从系统研究(如地球关键带)的视角理解生物地球化学过程和物质循环。物质循环在水平和垂直尺度上的迁移转化并非是独立的,其动态变化与周围环境(水、土、气、生)密不可分。因此,对全球变化背景下的喀斯特系统生物地球化学循环应基于多学科交叉和表层地球系统科学理论,从系统研究视角结合观测、实验和模型来理解其物理、化学和生物过程及其耦合作用,这对于系统认识冠层到基岩的物质迁移、平衡与转化过程以及揭示喀斯特地区生物地球化学循环过程与机制具有重要意义;

(2)多尺度观测—分析与综合模型集成研究并举。喀斯特系统物质循环是短时间尺度—长时间尺度和点尺度—区域尺度—全球尺度耦合的生物地球化学过程,水文过程是物质循环主要的驱动力。低频监测无法充分反映关键带物质迁移转化,也无法揭示物质循环对水文过程的响应规律。因此,未来应采用自动化高频监测仪或水文敏感期高频采样,以揭示关键带生物地球化学循环的动态变化规律。此外还应结合空天地多维度观测分析,未来还应整合不同时空尺度喀斯特地区生物地球化学循环的研究,以探究区域乃至全球尺度生物地球化学循环对

全球变化的响应;

(3)构建多源多尺度耦合的过程和系统模型。为探究喀斯特地区物质来源及循环过程,以及物质系统循环的驱动力和控制机制,未来应逐步建立基于流域尺度岩溶动力系统的多源多尺度耦合的过程和系统模型。积极应用地球化学、环境地理学、模型和系统分析等多领域研究方法,并结合室内实验和典型喀斯特地区实地调研,从而为生态环境可持续维持、流域系统分析以及喀斯特系统模型研究提供理论支撑。并通过与社会决策机制相结合,推动基于环境—社会系统和谐权衡条件下喀斯特特生态环境的可持续发展。

参考文献

- [1] Mackenzie Fred T, Ver Leah May, Lerman Abraham. Century-scale nitrogen and phosphorus controls of the carbon cycle[J]. *Chemical Geology*, 2002, 190(1-4): 13-32.
- [2] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
LIU Congqiang. Biogeochemical processes and surface matter cycles: erosion and biomass cycles in karst basins of southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] Lin Henry. Earth's critical zone and hydopedology: concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 6(1): 3417-3481.
- [4] Daniel Deb, Richter Jr, Megan L Mobley. Monitoring Earth's critical zone[J]. *Science*, 2009, 326: 1067-1068.
- [5] 刘从强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 1-12.
LIU Congqiang, LANG Yuncao, LI Siliang, PIAO Hechun, TU Chenglong, LIU Taoze, ZHANG Wei, ZHU Shufa. Researches on biogeochemical processes and nutrient cycling in karstic ecological systems, southwest China: a review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 1-12.
- [6] Goldscheider Nico, Chen Zhao, Auler Augusto S, Bakalowicz Michel, Broda Stefan, Drew David, Hartmann Jens, Jiang Guanghui, Moosdorf Nils, Stevanovic Zoran, Veni George. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [7] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qiong. *Modern Karstology* [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [8] Li Si Liang, Liu Cong Qiang, Chen Jin An, Wang Shi Jie. Karst ecosystem and environment: characteristics, evolution processes, and sustainable development[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306: 107173.

- [9] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LIU Congqiang. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the Earth's surface: Cycling of nutrients in soil-plant systems of karstic environments, southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [10] Maaroufi Nadia I, Long Jonathan Rde. Global change impacts on forest soils: linkage between soil biota and carbon-nitrogen-phosphorus stoichiometry[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, 3: 16.
- [11] Zeng Cheng, Gremaud Vivian, Zeng Hai Tao, Liu Zai Hua, Goldscheider Nico. Temperature-driven meltwater production and hydrochemical variations at a glaciated alpine karst aquifer: implication for the atmospheric CO₂ sink under global warming[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 65(8): 2285-2297.
- [12] Zhong Jun, Li Si Liang, Ibarra Daniel E, Ding Hu, Liu Cong Qiang. Solute production and transport processes in Chinese monsoonal rivers: implications for global climate change[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(9): e2020GB006541.
- [13] Zeng Si Bo, Liu Zai Hua, Kaufmann Georg. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5749.
- [14] Zhong Jun, Wallin Marcus B, Wang Wan Fa, Li Si Liang, Guo Lao Dong, Dong Ke Jun, Ellam Rob M, Liu Cong Qiang, Xu Sheng. Synchronous evaporation and aquatic primary production in tropical river networks[J]. *Water Research*, 2021, 200: 117272.
- [15] Chen Shuai, Zhong Jun, Li Si Liang, Ran Lishan, Wang Wan Fa, Xu Sen, Yan Ze Long, Xu Sheng. Multiple controls on carbon dynamics in mixed karst and non-karst mountainous rivers, Southwest China, revealed by carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{14}\text{C}$)[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148347.
- [16] 张喜, 朱军, 崔迎春, 霍达, 王莉莉, 吴鹏, 陈骏, 潘德权, 杨春华. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5809-5817.
ZHANG Xi, ZHU Jun, CUI Yingchun, HUO Da, WANG Lili, WU Peng, CHEN Jun, PAN Dequan, YANG Chunhua. Influence of fire on a Pinus massoniana soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5809-5817.
- [17] 伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 王克林, 张伟, 邹冬生. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 429-437.
WU Fangji, LIU Na, HU Peilei, WANG Kelin, ZHANG Wei, ZOU Dongsheng. Soil carbon and nitrogen dynamics during vegetation restoration and their responses to extreme water-logging disasters in a typical karst depression[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 429-437.
- [18] Fang Chao, Li Feng Min, Pei Jiu Ying, Ren Jiao, Gong Yan Hong, Yuan Zi Qiang, Ke Wen Bin, Zheng Yang, Bai Xiao Ke, Ye Jian Sheng. Impacts of warming and nitrogen addition on soil autotrophic and heterotrophic respiration in a semi-arid environment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 449-457.
- [19] 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳. 季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1962-1970.
TANG Guoyong, ZHANG Chunhua, LIU Fangyan, LI Kun, MA Yan. Effects of seasonal asymmetric warming on soil CO₂ release in Karst region[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1962-1970.
- [20] 马志良, 刘美, 赵文强. 增温对高寒灌丛土壤呼吸不同组分的影响机制 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28(3): 636-642.
MA Zhiliang, LIU Mei, ZHAO Wenqiang. Influencing mechanisms of warming on the soil respiration components in an alpine scrubland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 28(3): 636-642.
- [21] 李博文, 王奇, 吕汪汪, 周阳, 姜丽丽, 刘培培, 孟凡栋, 张立荣, 张苏人, 阿旺, 李耀明, 斯确多吉, 汪诗平. 增温增水对草地生态系统碳循环关键过程的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1668-1679.
LI Bowen, WANG Qi, LV Wangwang, ZHOU Yang, JIANG Lili, LIU Peipei, MENG Fandong, ZHANG Lirong, ZHANG Suren, A Wang, LI Yaoming, SI Queduoji, WANG Shiping. The effects of warming and added water on key processes of grassland carbon cycle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1668-1679.
- [22] Zhang Fang Yue, Quan Quan, Song Bing, Sun Jian, Chen You Jun, Zhou Qing Ping, Niu Shu Li. Net primary productivity and its partitioning in response to precipitation gradient in an alpine meadow [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15193.
- [23] Xu Zhu Wen, Ren Hai Yan, Li Mai He, Brunner Ivano, Yin Jin Fei, Liu He Yong, Kong De Liang, Lv Xiao Tao, Sun Tao, Cai Jiang Ping, Wang Ru Zhen, Zhang Yong Yong, He Peng, Han Xing Guo, Wan Shi Qiang, Jiang Yong. Experimentally increased water and nitrogen affect root production and vertical allocation of an old-field grassland[J]. *Plant and Soil*, 2016, 412(1-2): 369-380.
- [24] 刘炜, 焦树林, 李银久, 莫跃爽, 张洁, 邵雨潇, 冯椰林. 贵州省 1960-2019 年不同地貌类型降水时空特征 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 159-171.
LIU Wei, JIAO Shulin, LI Yinjiu, MO Yueshuang, ZHANG Jie, SHAO Yuxiao, FENG Yelin. Spatial and temporal distribution characteristics of precipitation of different geomorphic types in Guizhou province from 1960-2019[J]. *Research Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 159-171.
- [25] 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平. 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4527-4537.
HAO Lianyi, ZHANG Lihua, XIE Zhongkui, ZHAO Ruifeng, WANG Junfeng, GUO Yafei, GAO Jiangping. Influence of precipitation change on soil respiration in desert grassland[J]. *Envi-*

- ronmental Science, 2021, 42(9): 4527-4537.
- [26] 吕文强, 王世杰, 刘秀明, 容丽. 喀斯特地区城市绿地土壤呼吸对降水变化的响应研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 174-180.
LV Wenqiang, WANG Shijie, LIU Xiuming, RONG Li. Influence of rainfall on soil respiration in karst urban green space[J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 174-180.
- [27] Yue Fu Jun, Li Si Liang, Waldron Susan, Wang Zhong Jun, Oliver David M, Chen Xi, Liu Cong Qiang. Rainfall and conduit drainage combine to accelerate nitrate loss from a karst agroecosystem: insights from stable isotope tracing and high-frequency nitrate sensing[J]. Water Research, 2020, 186(1): 116388.
- [28] Qin Cai Qing, Li Si Liang, Waldron Susan, Yue Fu Jun, Wang Zhong Jun. High-frequency monitoring reveals how hydrochemistry and dissolved carbon respond to rainstorms at a karstic critical zone, Southwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136833.
- [29] Li Liang, Cao Jian Hua, Huang Fen, Wang Pei, Liang Yi. Distribution and magnitude of geologic carbon sinks: a water balance study of the Chaotian River basin, Guilin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 913-920.
- [30] Zhong Jun, Li Si Liang, Liu Jing, Ding Hu, Sun Xiao Le, Xu Sheng, Wang Tie Jun, Ellam Rob M, Liu Cong Qiang. Climate variability controls on CO₂ consumption fluxes and carbon dynamics for monsoonal rivers: evidence from Xijiang River, Southwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(8): 2553-2567.
- [31] Crutzen Paul J. Geology of mankind[J]. Nature, 2002, 415(6867): 23.
- [32] Li Si Liang, Xu Sen, Wang Tie Jun, Yue Fu Jun, Liu Cong Qiang. Effects of agricultural activities coupled with karst structures on riverine biogeochemical cycles and environmental quality in the karst region[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2020, 303: 107120.
- [33] Zeng Cheng, Li Yan Bing, Bai Xiao Yong, Luo Guang Jie. Evaluation of karst soil erosion and nutrient loss based on RUSLE model in Guizhou province[J]. Earth and Environmental Science, 2017, 108: 032014.
- [34] Zhu Xiao Cong, Ma Ming Guo, Tateno Ryunosuke, He Xin Hua, Shi Wei Yu. Effects of vegetation restoration on soil carbon dynamics in Karst and non-karst regions in Southwest China: a synthesis of multi-source data [J]. Plant and Soil, 2021.
- [35] Liu Xin, Zhang Wei, Wu Min, Ye Ying Ying, Wang Ke Lin, Li De Jun. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical karst catchment[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(1): 60-72.
- [36] Liu Man, Han Gui Lin, Zhang Qian, Song Zhao Liang. Variations and Indications of $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{SON}}$ in Soil Profiles in Karst Critical Zone Observatory (CZO), Southwest China[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2144.
- [37] Knops Johannes M, Tilman David. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment[J]. Ecology, 2000, 81(1): 88-98.
- [38] Marty Charles, Houle Daniel, Gagnon Christian, Courchesne Francois. The relationships of soil total nitrogen concentrations, pools and C: N ratios with climate, vegetation types and nitrate deposition in temperate and boreal forests of eastern Canada[J]. Catena, 2017, 152: 163-172.
- [39] Jiang Yong Jun, Yuan Dao Xian, Zhang Cheng, Kuang Ming Sheng, Wang Jian Li, Xie Shi You, Li Lin Li, Zhang Gui, He Rao Sheng. Impact of land-use change on soil properties in a typical karst agricultural region of Southwest China: a case study of Xiaojiang watershed, Yunnan[J]. Environmental Geology, 2006, 50(6): 911-918.
- [40] 王敏. 快速城市化进程对环境多介质有机碳的分布特征影响研究: 以南昌市为例 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2017.
WANG Min. The effects of rapid urbanization on the distribution patterns of organic carbon in multimedia: a case study of Nanchang [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.
- [41] Zhu Yong Guan, Reid Brian J, Meharg Andrew A, Banwart Steve A, Fu Bo Jie. Optimizing peri-urban ecosystems (PURE) to re-couple urban-rural symbiosis[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1085-1090.
- [42] 邱莎, 曹飞飞, 唐明方, 邓红兵. 能源对北京市城市碳循环的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6816-6825.
QIU Sha, CAO Feifei, TANG Mingfang, DENG Hongbing. Impact of energy on the urban carbon cycle of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6816-6825.
- [43] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析[J]. 地理学报, 2019, 39(18): 6816-6825.
ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin, PENG Buzhuo. Research on carbon cycle and carbon balance of Nanjing urban system[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 39(18): 6816-6825.
- [44] 熊雅萍. 长沙市碳循环评估与低碳土地利用研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.
XIONG Yaping. Evaluation of carbon cycle of Changsha urban system and decarbonization of land use [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2015.
- [45] 彭弋倪. 人类活动对流域风化碳汇过程的影响: 大河流域与城市表面小流域的范例研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018.
PENG Yini. Impacts of human activities on weathering and carbon sequestration in river basins: a case study of large river basins and urban karst watersheds [D]. Nanjing: Nanjing university, 2018.
- [46] Sun Yan Li, Ma Jian Hua, Li Can. Content and densities of soil organic carbon in urban soil in different function districts of Kaifeng[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(1): 148-156.
- [47] Raciti Steve M, Hutrya Lucy R, Finzi Adrien C. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces[J]. Environmental Pollution, 2012, 164: 248-251.

- [48] Akbarzadeh Zahra, Maavara Taylor, Slowinski Stephanie, Cappellen Philippe Van. Effects of damming on river nitrogen fluxes: a global analysis[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(11): 1339-1357.
- [49] Maavara Taylor, Parsons Christopher T, Ridenour Christine, Stojanovic Severin, Dürr Hans H, Powley Helen R, Cappellen Philippe Van. Global phosphorus retention by river damming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(51): 15603-15608.
- [50] Eiriksdottir Eydis Salome, Oelkers Eric H, Hardardottir Jorunn, Gislason Sigurdur Reynir. The impact of damming on riverine fluxes to the ocean: A case study from Eastern Iceland[J]. *Water Research*, 2017, 113: 124-138.
- [51] Wang Hao, Ran Xiang Bin, Bouwman Alexander F, Wang Jun Jie, Xu Bo Chao, Song Zhao Liang, Sun Shao Bo, Yao Qing Zhen, Yu Zhi Gang. Damming alters the particulate organic carbon sources, burial, export and estuarine biogeochemistry of rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127525.
- [52] Wang Wan Fa, Li Si Liang, Zhong Jun, Li Cai, Yi Yuan Bi, Chen Sai Nan, Ren Yi Meng. Understanding transport and transformation of dissolved inorganic carbon (DIC) in the reservoir system using $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and water chemistry[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 193-201.
- [53] Wang Fu Shun, Liu Cong Qiang, Wang Bao Li, Yu Yuan Xiu, Liu Xiao Long. Influence of a reservoir chain on the transport of riverine inorganic carbon in the karst area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(5): 1465-1477.
- [54] Gao Yang, Wang Bao Li, Liu Xiao Long, Wang Yu Chun, Zhang Jing, Jiang Yan Xing, Wang Fu Shun. Impacts of river impoundment on the riverine water chemistry composition and their response to chemical weathering rate[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(3): 351-360.
- [55] Peng Xi, Liu Cong Qiang, Wang Bao Li, Zhao Yan Chuang. The impact of damming on geochemical behavior of dissolved inorganic carbon in a karst river[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(19): 2348-2355.
- [56] Broadbent Arthur, Snell Helen, Michas Antonios, Pritchard William J, Newbold Lindsay, Cordero Irene, Goodall Tim, Schallhart Nikolaus, Kaufmann Ruediger, Griffiths Robert I, Schloter Michael, Bahn Michael, Bardgett Richard D. Climate change alters temporal dynamics of alpine soil microbial functioning and biogeochemical cycling via earlier snowmelt[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(8): 2264-2275.
- [57] Crowther Thomas W, Hoogen Johan Van, Wan Joe, Mayes Melanie, Keiser Ashley D, Mo Li Dong, Averill Colin, Maynard Daniel S. The global soil community and its influence on biogeochemistry[J]. *Science*, 2019, 365(6455): eaav0550.
- [58] Coban Oksana, Deyn Gerlinde B, Ploeg Martine Van. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands[J]. *Science*, 2022, 375(6584): eabe0725.
- [59] 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣. 喀斯特典型生态系统土壤有机碳积累特征与稳定机制[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 907-915.
- CHEN Xiangbi, HE Xunyang, HU Yajun, SU Yirong. Characteristics and mechanisms of soil organic carbon accumulation and stability in typical karst ecosystems[J]. *Research on Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 907-915.
- [60] 张双双, 靳振江, 贾远航, 李强. 岩溶区与非岩溶区3种土地利用方式下土壤细菌群落结构比较[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 164-172.
- ZHANG Shuangshuang, JIN Zhenjiang, JIA Yuanhang, LI Qiang. Comparison of soil bacterial community structures from three soil land-use between karst and non-karst areas under three kinds of land use[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 164-172.
- [61] Qiu Li Ping, Zhang Qian, Zhu Han Song, Reich Peter B, Banerjee Samiran, Heijden Marcel G, Sadowsky Michael J, Ishii Satoshi, Jia Xiao Xu, Shao Ming An, Liu Bao Yuan, Jiao Huan, Li Hai Qiang, Wei Xiao Rong. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(8): 2474-2489.
- [62] Cheng Cai, Li Yu Jie, Long Ming Zhong, Gao Min, Zhang Yuan Dong, Lin Jia Yu, Li Xiao Na. Moss biocrusts buffer the negative effects of karst rocky desertification on soil properties and soil microbial richness [J]. *Plant and Soil*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-11020-04602-11104>.
- [63] Guo Xue, Feng Jia Jie, Shi Zhou, Zhou Xi Shu, Yuan Meng Ting, Tao Xuan Yu, Hale Lauren, Yuan Tong, Wang Jianjun, Qin Yu Jia, Zhou Ai Fen, Fu Ying, Wu Li You, He Zhi Li, Nostrand Joy D, Ning Da Liang, Liu Xue Duan, Luo Yi Qi, Tiedje James M, Yang Yun Feng, Zhou Ji Zhong. Climate warming leads to divergent succession of grassland microbial communities[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 813-818.
- [64] Feng You Zhi, Zhang Jian Wei, Berdugo Miguel, Guirado Emilio, Guerra Carlos A, Egidi Eleonora, Wang Jun Tao, Singh Brajesh K, Delgado-Baquerizo Manuel. Temperature thresholds drive the global distribution of soil fungal decomposers[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(8): 2779-2789.
- [65] Stone Bram W, Li Jun Hui, Koch Benjamin J, Blazewicz Steven J, Dijkstra Paul, Hayer Michaela, Hofmockel Kirsten S, Liu Xiao Jun, Mau Rebecca L, Morrissey Ember M, Pett-Ridge Jennifer, Schwartz Egbert, Hungate Bruce A. Nutrients cause consolidation of soil carbon flux to small proportion of bacterial community[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3381.
- [66] Zeng Jun, Liu Xue Jun, Song Ling, Lin Xiang Gui, Zhang Hua Yong, Shen Qi Rong, Chu Hai Yan. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 92: 41-49.
- [67] Xu Sen, Li Si Liang, Su Jing, Yue Fu Jun. Oxidation of pyrite and reducing nitrogen fertilizer enhanced the carbon cycle by driving terrestrial chemical weathering[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144343.

Biogeochemical cycles of karst systems and their response to global change

LIU Xin¹, LI Siliang¹, YUE Fujun¹, ZHONG Jun¹, QIN Caiqing², DING Hu¹

(1. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract Biogeochemical cycles are the core of matter cycling in the earth system, and are critical to sustaining ecosystem stability and the development of human society. However, climate change and excessive human interference may significantly alter biogeochemical cycles in surface earth systems, especially fragile karst ecosystem. Meanwhile, the special porous critical zone structure in karst regions accelerates the material circulation and its response to the change of external environment, which affects the circulation of matter and biogeochemical process at different scales. Thus, this review mainly emphasized the effects of environmental changes on biogeochemical cycles in karst regions at macroscale (climate change), mesoscale (human activities), and microscales (microbial activities). The main contents are as follow.

(1) Climate change (including climate warming and precipitation anomaly) is a direct representation of global change, which not only influence the stability of ecosystem in the karst regions, but also determine local biogeochemical process and material circulation. Although climate warming may enhance the carbon sink function of the aquatic ecosystem in karst region, the watershed carbon sink effect would change with the increase of the warming degree. Moreover, disasters and extreme climate have a strong impact on the ecologically fragile karst regions, but sometimes also have important negative feedback significance to the restoration and reconstruction of regional ecosystem. Furthermore, climate warming can directly or indirectly promote soil respiration intensity by improving biological factors (e.g., physiological activity of underground roots) and abiotic factors (e.g., enzyme activity), but whether it can offset the weakening of soil respiration caused by the decrease of soil moisture content should be further studied. In addition to climate warming, precipitation anomaly also significantly affects soil respiration and watershed nutrient fluxes in karst critical zone, which have important impacts on global carbon cycle and local aquatic ecosystem security. Significantly, due to the coupling relationship between temperature and precipitation, single-factor analysis may not be able to comprehensively assess the impact of climate change on biogeochemical cycles. Therefore, laboratory and field experiments should be combined to comprehensively evaluate the impact of climate change on biogeochemical cycles and feedback on ecosystem stability in karst regions in future work.

(2) The impact of human activities on the environment and biogeochemical cycles in karst regions is multi-dimensional, especially land use change, urbanization and water conservancy projects. Land use conversion and vegetation cover change not only change the structure and function of the ecosystem in karst regions, but also change the nutrient cycling process of the ecosystem, thereby affecting the local biogeochemical cycling process. Moreover, urbanization in karst regions will significantly increase the carbon storage in urban systems. Therefore, a coupling system of urban-suburb-rural ecosystem should be established to formulate appropriate environmental management policies through reasonable allocation and sharing of resources in the future. Furthermore, the construction of water conservancy projects in karst watershed not only change the transportation and transformation processes of river particles and nutrients, but also change the geochemical behavior of Dissolved Inorganic Carbon (DIC) in river water, thus affecting the watershed carbon cycle. As we know, human activities have greatly changed the biogeochemical cycles in karst regions and led to new ecological and environmental problems. Therefore, reasonable measures should be taken under the premise of scientific evaluation in order to achieve ecological protection and sustainable development in karst regions.

(3) Microbes drive biogeochemical cycles through metabolic activities and respond rapidly to changing

environmental conditions to maintain global ecosystem stability. Compared to non-karst regions, the unique karst structure changes the diversity and abundance of microbes. As we know, biodiversity is changing at an unprecedented rate as a result of global change. Climate change affects biogeochemical cycles through controlling microbial community structure and biomass in karst regions. In addition, nutrients addition caused by human activities also affected the functional diversity and community structure of soil microbes in karst regions. And long-term fertilization not only significantly changed the availability of carbon and nitrogen in soil profile in karst regions, leading to differentiation of soil microbial community, but also changed the coupling relationship among different elements (e.g., C, N, P, S). Microbes play a vital role in biogeochemical cycles, which should be further studied in the future under the circumstances of climate change and intensified human activities.

As above, multi-factor changes have strongly influenced the matter cycling in karst regions, climate change, human activities, microbial activities and their coupling relationship are vital to regulate biogeochemical cycles. Meanwhile, we also stressed the limitations of existing research and pointed out the challenges and direction of future research. In the future, we should combine multi-scale monitoring-analysis and integrated model research from the perspective of system research (e.g., earth critical zone), so as to establish a multi-source and multi-scale coupling process and system model. Through the above methods, the evolution rules and dynamic mechanism of karst system are clarified, and the theoretical basis for ecological protection and high-quality development in karst regions are provided.

Key words karst system, climate change, human activities, microbial activities, biogeochemical cycles

(编辑 张玲 杨杨)