

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.

DOI: 10.11932/karst20220303

喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述

陈喜¹, 张志才²

(1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对我国西南喀斯特地区生态环境演变历史及新的形势下面临的挑战问题, 系统地总结了植被退化、人工恢复、自然演替三个阶段植被、水文、土壤和溶蚀等观测实验得出的成果, 阐述了喀斯特生态水文模型的发展及存在的问题。以地球关键带科学系统思维和多学科综合研究范式, 提出了喀斯特地区大气—植被—土壤—岩石系统结构和组成以及协同演变理念; 从多学科交叉、系统观测、模型集成视角, 探讨了生态水文与碳、水、钙循环协同演变的研究途径, 并以此提出推动喀斯特生态水文学发展的建议, 为全球气候变化和绿色发展形势下喀斯特地区生态环境恢复提供科学支撑。

关键词: 地球关键带; 喀斯特; 表层岩溶带; 生态水文学; 绿色发展; 综述

中图分类号: P333; P931.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 03-0356-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

喀斯特地表水和地下水循环及其水资源具有独特的时空分布特征, 喀斯特水在人类社会生存和发展中发挥着重要作用。全球喀斯特面积约2200万km²(占地球陆地面积15%), 为世界约1/4的人口提供饮用水源^[1]。在我国湿热的西南喀斯特地区广泛分布的质纯坚硬碳酸盐岩, 喀斯特关键带中CO₂-H₂O-CaCO₃活跃的生物与化学过程形成密集发育的岩溶微形态以及裂隙和管道网络系统, 导致喀斯特流域不闭合, 地表、地下水文和水动力过程以及流域物质、能量平衡计算复杂, 生态系统稳定性差、承灾能力弱等脆弱性特征^[2-4]。

我国自开展绿色生态工程、大规模退耕还林等生态保护措施以来, 植被生态系统在历经半个多世纪退化和生态赤字后已发生历史性转变。西南喀斯特地区生态系统已从大规模石漠化向植被显著恢复

阶段演变, 但植被恢复程度呈现显著空间差异, 一些地区生态恢复措施未能达到预期成效, 局部地区生态仍处于退化阶段、水土流失等环境灾害仍在加剧^[5-7], 引发对目前人工控制恢复模式和恢复潜力的质疑。受损的生态系统从退化到恢复阶段的生态环境演变不是完全可逆过程, 生态退化导致的石漠化过程水土状态短时段难以逆转。此外, 气候变化可能导致极端洪旱事件的增加^[5], 从而影响植被自然演替和植被群落的稳定性。因此, 在绿色发展理念以及全球变化背景下迫切需要解答未来植被恢复前景及其生态水文效应, 如植被恢复潜力有多大, 植被恢复“调水”、“增效”的生态水文效应, 即表土/裂隙水分、养分漏失是否减少, 赋存能力是否增强? 减少或增强程度有多大?

回答上述问题需要在跨越较大的时间尺度上(如百年以上)解析喀斯特地区水循环过程与陆表生态、土壤和岩溶发育协同演化机理(图1, 图2)。21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030506)

第一作者简介: 陈喜(1964—), 男, 教授, 博士, 从事流域生态水文研究。E-mail: xi_chen@tju.edu.cn.

收稿日期: 2022-02-28

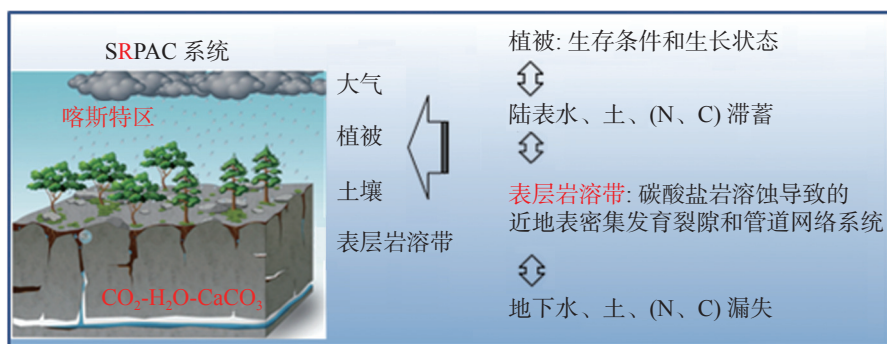


图1 喀斯特土壤-岩石-植被-大气系统(SRPAC)

Fig. 1 Soil-Rock-Plant-Atmosphere-Continuum

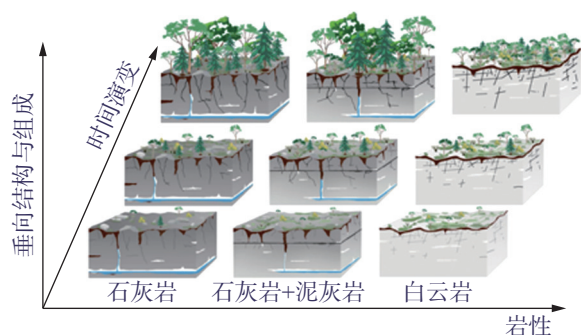


图2 喀斯特SRPAC系统演变及其控制要素

Fig. 2 Evolution of karst SRPAC system and its controlling elements

世纪初建立的地球关键带科学(the Earth's critical zone, CZO)^[8],提出了多学科合作、系统观测表层地球系统(风化壳底部—植物冠层)发生的物理、化学、生物过程,以解释地球关键带演替模式以及维持地球关键带功能的动力学过程,更好地模拟和预测表层地球系统演化及其对水、土资源可持续利用的影响^[9]。水文学也提出流域协同演变理念,旨在通过研究流域空间特征(土壤序列、坡面形态、河网、植被分布)及其驱动和控制要素(气候、基岩风化和构造隆升)的变化与水文动态的互馈机理,发展流域协同演化的多过程耦合模型,提高水文演变预测精度^[10]。因此,喀斯特水文需突破传统以地表水和地下水的发生发展规律、相互转化关系以及化学性质和水资源评价为核心的研究范畴,生态水文学需要将大气—植被—土壤系统(SPAC)拓展至大气—植被—土壤—岩石系统(图2中SRPAC),从更长的时间尺度研究SRPAC中水分、能量交互作用机制及其结构和组成的演变机制。袁道先先生提出的岩溶动力学,为喀斯特地区践行当代地球关键带科学实践提供了科学指导思想和研究范式。通过研究岩溶系统内碳、水、

钙循环为主的物质、能量传输、转换机制,为揭示喀斯特水循环过程与陆表生态系统以及地貌的形成和演化规律,探寻解决喀斯特地区当今人类社会面临的生态环境问题,水资源和矿产资源开发利用途径^[11]。

本文结合我国西南岩溶地区大量科学研究成果,从喀斯特关键带科学视角,论述喀斯特植被、土壤和岩石组织结构与水文和生态水文观测实验、动力学模拟的研究进展及发展;基于岩溶动力学理论,阐述喀斯特地区碳、水、钙循环下表层岩溶带与水文协同演变机制及发展途径,为全球气候变化和绿色发展形势下喀斯特地区生态环境恢复提供支撑。

1 喀斯特生态水文学发展

生态水文是维护自然生态系统的可持续性、重建退化生态系统的科学基础。通过研究水文—生态互馈机理,即水文过程如何影响生态群落分布、结构、功能变化,以及生态系统演变又如何反馈于水文过程(产生的水文效应),通过对流域内水文和生态系统的共同调控,生态水文可以为流域水、生物多样性、生态服务以及对气候变化的适应性四个方面提供科学支撑^[12]。

1.1 西南喀斯特地区覆被变化及生态水文效应

我国西南喀斯特生态环境经历了大规模植被退化、人工恢复、自然演替三个阶段(图3)。在20世纪80年代之前,受高强度人类活动影响,生态系统退化、水土流失严重,约1/4面积(13万km²)呈现基岩裸露的石漠化景观。自20世纪80年代中期采取一系列石漠化治理工程,特别是2000年实施退耕还林工程以来,人为干扰显著减少,生态恢复总体显著^[7],但恢复程度区域差异显著,有的石山封山后几年即

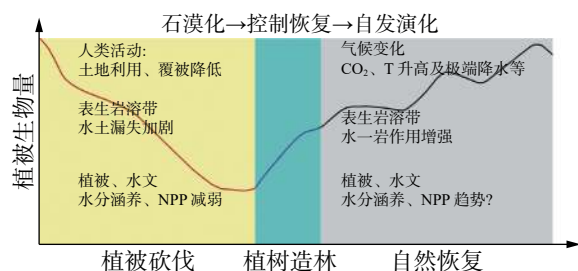


图3 喀斯特地区生态退化向恢复转变
环境要素变化及驱动机制

Fig. 3 Environmental factors changes and driving mechanisms
in the transition from ecological degradation to ecological
restoration in karst area

可恢复植被,而有的石漠化地区经过数十年的封育保护仍无法形成森林^[13],导致这种结果的主要原因是支撑覆被恢复的水土等条件发生了逆转。石漠化阶段呈现植被退化>土壤流失、质量下降>水分滞蓄能力降低>植被原有的立地条件不复存在,植被群落处于逆向演替>水赋存的二元结构被破坏,水分赋存环境逐渐向干旱化发展的恶性循环^[14],表层岩溶带对岩溶管道泉调蓄能力减弱,泉水动态随降雨动态变化更为迅速,不稳定性增强^[15]。石漠化严重地区即便人为干扰减轻,次生植物群落仍长期停留在草丛或灌木林阶段,很难向森林植被演替。目前采用的退耕还林—蓄水保土—人工造林恢复植被模式^[16],有的石山地区引种某种经济作物第一年丰收后第二年即退化、或蔓延开来抑制其它作物生长^[13],引发对人工控制恢复模式和人工植被稳定性的质疑。

大范围人工植树造林增加了流域水分蒸发消耗(“绿水”),如全球范围内大量草地被森林取代导致蒸散量增加30%^[17],减少河川径流量等可利用水资源量(“蓝水”)。在降水量较小的干旱、半干旱地区,当人工植被超过某一临界值时,将导致覆被增加>蒸腾耗水增大>土壤含水量降低>抑制植被生长。在降水量丰沛的非喀斯特湿润区,陆表土壤水分赋存、调蓄能力强,植被恢复呈现良性生态水文效应:植被恢复>蒸腾耗水增大>土壤水分调蓄能力增强>促进植被生长,水资源承载力增强。西南岩溶地区降雨量丰沛,但表土持水能力弱,且成土速率慢,在石漠化地区采用人工植被恢复措施或调节水土资源等措施,能否形成或多大程度上形成促进植被恢复的良性生态水文效应,即由草丛向顶极阶段正向演替>表土/裂隙水分赋存增强>植物群落稳定性增强的循环^[18],仍不明晰。

在植被恢复相对漫长的过程中,随着人工控制恢复向植被自发演替方向发展,全球气候变化对生态水文过程影响将日益显著。至20世纪50年代以来,西南喀斯特地区气候变化呈现温度显著升高(0.16 °C/10年)^[19],以及降水雨季雨强日趋增大、无雨时间增长趋势^[20],未来气温升高可能导致极端洪涝、干旱事件进一步增加^[21]。气温升高增强植被光合作用和水分利用,干旱等极端降水事件导致的植被水分匮乏阻碍植被生长和光合作用,大气中CO₂增加的施肥效应促进植被生长,进而影响土壤水分、蒸散发和径流等水文过程,因此,生态水文学研究需要拓展至大气—水文—生态之间互馈作用^[22]。持水能力弱的南方喀斯特地区,生态系统功能变化幅度对气温、降水量变化响应明显大于非喀斯特区,且森林、灌丛、草地不同植被类型对气候变化响应、自我修复能力、抗旱抗涝存在差异^[3]。湿热的西南喀斯特地区,生态景观演变在多大程度上受自然和人为因素影响,引发生态退化和恢复进程中驱动因素的争议,如石漠化发生、发展过程中自然和人为双重作用的程度,当今大规模覆被增加的悖论(极端干旱事件的增加预期降低植被覆盖率,但植被覆盖率呈现增加趋势)^[23]。在植被向自发演替方向发展阶段,迫切需要回答未来气候变化对植被自然演替的影响程度,预测植被群落的稳定性和恢复的可持续性,这也是全球绿色发展关注的热点问题^[24-25]。

1.2 表层岩溶带结构与植被水分利用

喀斯特地区SRPAC系统(图1)中水分、能量交互作用控制生态水文动态变化。浅薄的土壤储蓄的水分一般不足以维持植物生存和生长水分消耗的水库,在土壤/岩石交错的垂直岩溶带底部或相对阻水岩层上部(即表层岩溶带),雨季或雨后具有一定的水分滞蓄能力^[26],成为支撑植被生长、植被抵御干旱的重要水分来源^[27-28]。因此,表层岩溶带含水介质的构成和尺度控制植被对表层岩溶水获取的比例和水量^[27]。

喀斯特地区表层岩溶带裂隙发育有利于水分滞蓄,但表土和表层岩溶带滞蓄水能力(约为40 mm)^[27]远比湿润的非喀斯特地区土壤蓄水能力小(120 mm左右),植物为适应特殊的喀斯特环境,其生理特征具有一系列旱生特点。大部分根系位于近地表浅薄处,地下生物量低。如对广西三种典型喀斯特生境

(浅薄土壤、裸岩和松散的石灰土)的乔木和灌木根系调查表明,生长在岩石裂隙中植物最大生根深度灌木不超过 40 cm、乔木不超过 120 cm^[29]。对茂兰地区喀斯特植被根系生物量调查表明,无论是细根和小根(根径<5 mm)、中根(5~10 mm),还是粗根(>10 mm),其生物量的 97.9% 分布于地下 10 cm 的垂直空间内^[30]。根系生物量的分配和分布格局反映了其对水分亏缺、土壤养分贫乏的适应。由此,表层岩溶带不同小生境类型的水分、土壤状态形成不同的植被演替格局,如黔中地区 6 种表层岩溶带(石面、石缝、石沟、石洞、石槽、土面)中,植被群落恢复(草丛>草灌>藤刺灌丛>次生乔林>常绿阔叶林)石面面积最大,土面、石沟、石缝次之,面积最低的是石槽和石洞^[31]。

1.3 喀斯特生态水文模型

流域生态水文模型是模拟和预测气候变化和人类活动影响下生态水文演变的有效手段。近年来,生态水文模型得到长足发展,从覆被变化对蒸散发、根系吸水、冠层能量传输模拟和预测功能,发展到水文与植被生理生态动态过程(如光合作用—气孔行为—蒸腾作用)相耦合的模型,增强了全球和流域尺度上大气、植被和水循环过程模拟功能,广泛应用于土地利用与气候变化下生态水文效应评估^[32]。

适用于喀斯特地区的生态水文模型还很缺乏,主要是喀斯特关键带结构的高度异质性,水流运动可呈现基质达西流、大裂隙和管道中紊流特征,各种水流成分的流速或滞时相差极大(如水力传导度在 10 个数量级以上)^[33]。对此,水文学、地球化学、岩土工程等学科发展了一系列定量表述岩溶水流运动的数学物理模型。模型结构从简单的等效多孔介质模型,发展到孔隙、裂隙和管道的双重以及三重介质水流运动模型。但该类基于岩溶水动力的模型应用需要详细的裂隙、管道网络系统信息,因此,应用于较大尺度流域含水层水动力过程模拟和预测还存在很大的不确定性。

另一种是基于水文学水热平衡计算途径,如张志才等^[34]基于分布式植被—土壤—水文模型(DHSVM)中分层水平衡计算方法,增强根系层中表层岩溶带以及地表河和地下河水流演算功能,模拟和预测陈旗流域气候和覆被变化对植被耗水(蒸散发)影响,但该类模型基于遥感植被动态作为模型输

入,不具有植被—水分动态互馈功能。近年来基于碳水循环机理建立的全球植被动态模型(Lund Potsdam-Jena, LPJ),具有植被动态与水、碳等耦合机制,但流域水文过程过于概化,更缺乏对喀斯特裂隙、管道等多重水流模拟功能。对此,蔡练斌等^[35]基于 LPJ 模型,增加模型对表层岩溶带滞蓄水分模拟功能,初步实现喀斯特地区植被—水文动态耦合模型构建。应用于三岔河流域两种岩性区(碳酸盐岩和碎屑岩),根据土壤和表层岩溶带水力参数(渗透系数、滞蓄水量等)以及典型植被(温度针叶常绿林、温度阔叶常绿林、温度阔叶夏绿林、灌木、草(C3))功能性参数,对比 2000 年代实施生态恢复工程覆被指数(NDVI 和 LAI)以及预测的潜在植被指数差异及其水资源效应,得出目前植被状态仅达到恢复潜力的 25% 左右,当植被自然恢复至顶级状态时,将导致径流量减少 11.2%。

由于喀斯特地区植被、土壤、岩石裂隙发育空间的异质性大,上述建立的生态水文模型对植被根系层渗透系数和滞蓄水分能力参数概化,还不足以描述不同类型植被根系分布与土壤、裂隙和管道网络结构之间的关系,覆被恢复对水分调节能力的影响还有待研究。

2 基于岩溶水动力学理念的喀斯特水文学发展展望

虽然不同学科针对喀斯特关键带结构和组成及其对水文和生态的影响取得了大量定性认识或(半)量化研究成果,但还缺乏将这些不同领域研究成果提升至以碳-水-钙物质循环及其与气候、生态协同演变的系统性研究水平。为此,笔者认为需要在下列几个方面发展喀斯特生态水文学。

2.1 加强对喀斯特植被、水文与表层岩溶带协同演变机理研究

喀斯特表层岩溶带的形成本质上是水中 CO₂ 与可溶性碳酸盐岩长期水岩作用的结果。研究表明,西南喀斯特地区溶蚀速率大,如桂林地区碳酸岩溶蚀速率近 90 mm·ka⁻¹^[36-37],石林地区的综合溶蚀率为 32~73 mm·ka⁻¹^[38],地下溶蚀速率为地上溶蚀速率的 2~3 倍^[39]。伴随着日益显著的气候变化(干湿交替和酸雨加剧、CO₂ 浓度升高等)和人类活动影响,近地

表溶蚀作用日益显著,进而导致表层岩溶带裂隙、管道网络结构及其水分运动和赋存能力发生显著变化。在植被长期演变(如草本群落恢复至顶极群落经历近百年尺度^[40])过程中,溶蚀可导致隙宽从 mm 级至 cm 级,渗透系数从小于 $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,水流运动形态可从层流转化为紊流^[1]。溶蚀作用将导致裂隙网络不断向深部发育,地表形成负地形和土壤覆盖的洼地^[41]。地下岩石裂隙溶蚀越快,上覆负地形发育速度越快。

随着表层岩溶带裂隙和管道发育程度加大,表层滞蓄水分下移,迫使植被根系改变其耗水策略以及耗水深度与范围,以应对水分胁迫^[42]。同时植被根系对岩石裂隙的根劈作用^[43]、植被及其生物作用产生的 CO_2 增强水—岩作用^[44],进而可促进表层岩溶带裂隙发育和对径流的调节作用。这些作用强度受植被种类、生长发育、根径大小、根系密度以及延伸范围等多种因素影响^[45-46]。

因此,利用岩溶动力学理论,加强 SRPAC 系统内多要素、多过程之间协同演化研究,是认知喀斯特地区水土资源演变趋势和植被恢复潜力、乃至喀斯特地貌形成演化的关键^[47]。

2.2 创建喀斯特生态水文与表层岩溶带协同演变的动力学模型

强力溶蚀作用下表层岩溶带裂隙、管道网络结构及其水分运动和赋存能力的变化,使得生态水文模拟和预测中的假设(如假设表层岩溶带结构储水、导水系数等稳定不变或已知)^[8,10]不再成立,因此,需要建立考虑喀斯特地区植被—水文—生态—土壤/岩石之间的相互作用动力学模型。

喀斯特地区水—岩间的相互作用及建模涉及多个物理化学反应过程,主要包括渗流场和溶质场等。碳酸盐岩溶解和沉淀不仅受岩石接触的水量和水流动力条件控制,其溶蚀速率还受岩性、 CO_2 分压、pH、温度等多种因素控制^[48]。自 20 世纪 70 年代以来,发展了一系列考虑复杂裂隙形态中水动力和水化学过程的溶蚀动力模型,如区分固相表面与均匀溶液区之间的扩散边界层,以及均匀溶液区溶质对流扩散作用的 PWP 模型和 DBL 模型,应用于方解石溶解或沉积速率的模拟和预测^[49];考虑裂隙粗糙面引起速度场、浓度场的时空变化,建立时变局部动区—不动区(非费克)比例的瞬态蓄量模型(FSTS),定量分

析动区—不动区溶质浓度变化对穿透曲线的影响^[50-51]。

上述模型已应用于特定条件下岩溶含水系统的演化及其对岩溶泉变化的影响模拟。如毛亮等^[52]基于生成的灰岩含水层随机裂隙网络,假设特定降水、初始裂隙状态等条件下,模拟岩溶含水系统溶蚀的主要部分、岩溶泉汇流管道的隙宽变化等。王云等^[53]基于地下水渗流和碳酸盐溶蚀数值模型,模拟均质和非均质岩溶盆地含水系统发育过程,得出在大裂隙网导水作用下 3ka 后非均质盆地比均质盆地的孔隙率增幅大 34%。Wang 等^[50]通过研究碳酸岩裂隙的化学溶蚀演化过程,推导出裂隙渗透系数随时间呈线性增长的规律。

国际上已初步建立了具有岩溶裂隙管道及地貌演变模拟和预测功能的模型,代表性的是 Liedl 等^[54]建立的碳酸岩溶蚀过程与水动力过程耦合模型(CAVE),具有模拟表层岩溶带裂隙、管道扩展过程功能。Bauer 等^[55]利用该模型反演出裂隙网络结构呈现树枝状和网状形态的水动力条件。Fleurant 等^[47]在地貌演化模型(CHILD)中耦合 CAVE 模型,模拟出喀斯特峰丛地貌演化的理想形态。

近年来,土壤和岩土工程学界在植被—裂隙—水流相互作用模型构建方面开展了一系列探索性研究,如建立了考虑植物根系形状的地下水渗流与地表径流耦合运移模型^[56];通过建立裂隙岩体植物根劈的物理模型和断裂力学模型,模拟不同形状的植物根系水力作用、根系膨胀力与裂隙岩体的断裂破坏过程^[45];生态水文学通过建立植被根系发育特征与土壤特性和水力参数之间的物理表述,间接地反映植物的物理和生物化学作用对土壤、岩石裂隙以及入渗水的影响^[57]。

由于喀斯特地区的裂隙发育和演化的非均质性极强,建立具有不同大小和形态的裂隙、管道网络系统以及多重水流状态、复杂的物理和生物化学作用,能准确反映这些空间异质性特征的表层岩溶带水流运动—溶质运移耦合模型,并将其应用于实际,仍然极具挑战性。

2.3 加强喀斯特地球关键带生源要素综合观测和多学科交叉研究

喀斯特关键带结构具有强烈的空间变异性和不确定性,针对少数区域和地点得到的定性和定量

分析结果,不足以解析其结构和组成演化的区域规律并建立具有普适性的定量表述方法^[58],难以推广和应用^[59-60]。因此,国际上按气候梯度、生态和地质类型等建立了一系列地球关键带观测网络,以期得出全球变化下生具有普适性的态环境演变理论、方法。但针对喀斯特关键带观测网还很缺乏,特别是在我国西南喀斯特地区,缺乏地球关键带观测网布局。

对此,基于喀斯特地区陆表生态、地表和地下岩溶结构等建立喀斯特关键带观测网。针对降水丰富、溶蚀强力的南方喀斯特地区,确定适用于喀斯特关键带多重水动力下的生源要素、观测频次标准和规范。在此基础上,综合利用地球物理探测技术、地球化学分析技术^[61]以及人工智能模拟技术,分析喀斯特地球关键带结构以及物质、能量循环和运动规律。以此,可解答关键带科学中提出的一系列关键科学问题:如能否通过对地球关键带的类型进行分类,提出量化关键带的形态、功能和动态变化普适性方法?如何根据关键带科学中的数据同化来创新模型并提高预测的可靠性;植被冠层和深层基岩之间存在何种联系与反馈机制,以及如何利用关键带观测站数据和模型推断气候、风化和构造的全球反馈?人为和自然的干扰对关键带服务功能的演化影响?这些问题的解答将促进岩溶动力学发展,进而将推动喀斯特生态水文学向多过程、多要素协同演变的发展,以提高喀斯特地区植被恢复和生态水文效应预测的可靠性。

3 结 论

喀斯特地区针对不同学科和领域对大气、水文、土壤和溶蚀以及生态等开展了大量研究,但还缺乏将这些片段化、孤立化研究提升至系统性研究水平。依据地球关键带科学系统思维和多学科综合研究范式,喀斯特地区生态水文学与碳—水—钙循环为主的岩溶动力学相结合,研究生态水文与流域其他要素之间的协同演变机制,可重塑影响生态水文各个要素演变的历史和现状,将突破当今水文学和生态水文学传统假设,即模拟和预测生态水文过程时假设土壤、岩溶裂隙等过程稳定不变或已知,以寻求适应自然生态环境演变规律,人类社会发展模式和资源可持续利用途径。

参考文献

- [1] Ford D C, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Wiley, Chichester, England, 2007.
- [2] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35 (3): 320-330.
HOU Wenjuan, GAO Jiangbo, PENG Tao, WU Shaohong, DAI Er. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 320-330.
- [3] 黄晓云, 林德根, 王静爱, 常晟. 气候变化背景下中国南方喀斯特地区NPP时空变化[J]. 林业科学, 2013, 49(5): 10-16.
HUANG Xiaoyun, LIN Degen, WANG Jing'ai, CHANG Sheng. Temporal and spatial npp variation in the karst region in South China under the background of climate change[J]. Scientia Sinicae, 2013, 49(5): 10-16.
- [4] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 魏朝富. 岩溶生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 1-9.
LI Yangbing, SHAO Jing'an, WANG Shijie, WEI Chaofu. A conceptual analysis of karst ecosystem fragility[J]. Progress in Geography, 2006, 25(5): 1-9.
- [5] FENG Xiaoming, FU Bojie, PIAO Shilong, WANG Shuai, Philippe Ciais, ZENG Zhenzhong, Lü Yihe, ZENG Yuan, LI Yue, JIANG Xiaohui, WU Bingfang. Revegetation in china's loess plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [6] LIANG Wei, BAI Dan, WANG Feiyu, FU Bojie, YAN Junping, WANG Shuai, YANG Yuting, LONG Di, FENG Minquan. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a budyko hydrological model in china's loess plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [7] 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. Increased vegetation growth and carbon stock in china karst via ecological engineering[J]. Nature Sustainability, 2018, 1: 44-50.
- [8] NRC, National Research Council. Basic research opportunities in earth sciences [R]. National Academies Press, Washington, DC. 2001.
- [9] Banwart S A, Chorver J, Gaillardet G, et al. Sustaining Earth's Critical Zone Basic Science and Interdisciplinary Solutions for Global Challenges [M]. 2013, United Kingdom, ISBN: 978-0-9576890-0-8.
- [10] Troch Peter A, Lahmers Tim, Meira Antonio, Mukherjee Rajarshi, Pedersen Jonas W, Roy Tirthankar, Valdes-Pineda Rodrigo. Catchment coevolution: A useful framework for improving predictions of hydrological change?[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 4903-4922.
- [11] 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.

- YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Karst dynamics theory in China and its Practice[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 355-365.
- [12] Kochendorfer J P, Ramirez J A. Ecohydrologic controls on vegetation density and evapotranspiration partitioning across the climatic gradients of the central united states[J]. *Hydrology Earth System Sciences*, 2008, 14(10): 2121-2139.
- [13] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 西南岩溶山地石漠化及生态恢复研究展望[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 84-88.
LI Yangbing, WANG Shijie, RONG Li. Prospect of the study on rock desertification and its restoration in southwest Karst mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 84-88.
- [14] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 何腾兵, 龙健. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 26-32.
LIU Fang, WANG Shijie, LUO Haibo, LIU Yuansheng, HE Tengbin, LONG Jian. Vegetation Succession with karst rocky desertification and its impact on water chemistry of runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 26-32.
- [15] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 何师意. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(2): 106-110.
JIANG Zhongcheng, WANG Ruijiang, PEI Jianguo, HE Shiyi. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(2): 106-110.
- [16] 王荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 1070-1080.
WANG Rong, CAI Yunlong. Management modes of degraded ecosystem in southwest karst area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 1070-1080.
- [17] Sirimarco X, Barral M P, Villarino S H, et al. Water regulation by grasslands: a global meta - analysis[J]. *Ecohydrology*, 2018: e1934.
- [18] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
WANG Shijie, LI Yangbing, LI Ruiling. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive taming [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657-666.
- [19] Liu B J, Chen C L, Lian Y Q, Chen J F, Chen X H. Long-term change of wet and dry climatic conditions in the southwest karst area of China[J]. *Global & Planetary Change*, 2015, 127: 1-11.
- [20] 张志才, 陈喜, 王文, 石朋. 贵州降雨变化趋势与极值特征分析[J]. *地球与环境*, 2007, 35(4): 351-356.
ZHANG Zhicai, CHEN Xi, WANG Wen, SHI Peng. Analysis of rainfall trend and extreme Events in Guizhou [J]. *Earth and environment*, 2007, 35(4): 351-356.
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis 4* [R], 15, 2013.
- [22] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40: 3-1-3-26.
- [23] Zhu Z C, Piao S, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Chen L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Penuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocher B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [24] Christopher R Schwalm, William R L Anderegg, Anna M Michalak, Joshua B Fisher, Franco Biondi, George Koch, Marcy Litvak, Kiona Ogle, John D Shaw, Adam Wolf, Deborah N Huntzinger, Kevin Schaefer, Robert Cook, Yaxing Wei, Yuanyuan Fang, Daniel Hayes, Maoyi Huang, Atul Jain, Hanqin Tian. Global patterns of drought recovery[J]. *Nature*, 2017, 548(7666): 202-205.
- [25] Doughty C E, Metcalfe D B, Girardin C A J, Amezquita F F, Cabrera D G, Huasco W H, Silva-Espejo Araujo-Murakami A. Araujo-Murakami A. da Costa M C. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia[J]. *Nature*, 2015, 519(7541): 78-82.
- [26] 陈喜, 张志才, 容丽, 等. 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.
CHEN Xi, ZHANG Zhicai, RONG Li, et al. Water circulation process and its hydrological and ecological effects in karst areas of Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [27] 邓艳. 西南典型峰丛洼地岩溶关键带植被-表层岩溶水的耦合过程[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
DENG Yan. Coupling process between vegetation and epikarst water in karst critical zone, southwest typical peak-cluster depression area[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [28] RONG Li, CHEN Xi, CHEN Xunhong, WANG Shijie, DU Xuelian. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3666-3675.
- [29] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Ding Y L. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of Southwest China[J]. *Plant Ecology*, 2014, 215(10): 1099-1109.
- [30] 罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 张忠华, 祝介东, 倪健. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 611-618.
LUO Donghui, XIA Jing, YUAN Jingwei, ZHANG Zhonghua, ZHU Jiedong, NI Jian. Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of Southwestern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 611-618.
- [31] 司彬, 姚小华, 任华东, 李生, 何丙辉. 黔中喀斯特植被自然演替过程中物种组成及多样性研究: 以贵州省普定县为例[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(5): 81-86.
SI Bin, YAO Xiaohua, REN Huandong, LI Sheng, HE Binghui. Species composition and diversity in the process of natural succession of karst vegetation in central Guizhou: Case study of Puding country in Guizhou[J]. *Forest Research*, 2008, 21(5):

- 81-86.
- [32] 杨大文, 雷慧闽, 丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J]. 水力学报, 2010, 41(10): 1142-1149.
YANG Dawen, LEI Huimin, CONG Zhentao. Overview of the research status in interaction between hydrological processes and vegetation in catchment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1142-1149.
- [33] Worthington S R H. Types of permeability development in limestone aquifers in Britain[C]. Geophysical Research Abstracts, 11, EGU 2009.
- [34] Zhang Zhicai, Chen Xi, Ghadouani Anas, Peng Shi. Modelling hydrological processes influenced by soil, rock and vegetation in a small karst basin of Southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 2456-2470.
- [35] Cai Lianbi, Chen Xi, Huang Lichao, Keith Smettem. Runoff change induced by vegetation recovery and climate change over carbonate and non-carbonate areas in the karst region of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604, 1272: 31.
- [36] 曹建华, 王福星, 黄俊发, 黄基富, 王晶. 桂林地区石灰岩表面生物岩溶溶蚀作用研究[J]. 中国岩溶, 1993, 12(1): 11-22.
CAO Jianhua, WANG Fuxing, HUANG Junfa, HUANG Jifu, WANG Jin. The erosion action of biokarst on limestone in Guilin area[J]. *Carsologica Sinica*, 1993, 12(1): 11-22.
- [37] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 250-254.
QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng. A Review on recent advances and perspective in Epikarst water study[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 250-254.
- [38] 李玉辉, 梁永宁. 滇中路南石林的发育年代[J]. 中国区域地质, 1998, 17(1): 44-51.
LI Yuhui, LIANG Yongning. The ages of development of the lunanstone forest in central Yunnan[J]. *Regional Geology of China*, 1998, 17(1): 44-51.
- [39] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆, 重庆科技出版社, 1983, 59-71.
- [40] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复评价研究[J]. 林业科学, 2000, 36(6): 12-19.
YU Lifei, ZHU Shouqian, YE Jingzhong, WEI Luming, CHEN Zhengren. A study on evaluation of natural restoration for degraded karst forest[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(6): 12-19.
- [41] Ford D C, Williams P W. Karst Geomorphology and Hydrology[M]. CRC Press, Boca Raton, Fla, 1989.
- [42] Hasenmueller E A, Gu X, Weitzman J N, Adamsc T S, Stinchcomb G E, Eissenstat D M, Drohan P J, Brantley S L, Kaye J P. Weathering of rock to regolith: The activity of deep roots in bedrock fractures[J]. *Geoderma*, 2017, 300: 11-31.
- [43] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势[J]. 地理科学进展, 2000, 9(3): 193-202.
SONG Linhua. Progress and trend of karst geomorphology study[J]. *Progress in Geography*, 2000, 9(3): 193-202.
- [44] Van Breemen N, Lundström U, Jongmans A G. Do plant drive podsolization via rock-ating mycorrhizal fungi?[J]. *Geoderma*, 2000, 94: 163-171.
- [45] 樊维. 裂隙岩体植物根劈作用机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
FAN Wei. The mechanism study of rock-broken process by root-growth of plant in fractured rock[J]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [46] Lambers H, Mougél C, Jaillard B, Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: An evolutionary perspective[J]. *Plant Soil*, 2009, 321: 83-115.
- [47] Fleurant C, Tucker G E, Viles H A. Modelling cockpit karst landforms[J]. The Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London, 2008, 296: 47-62.
- [48] Detwiler R L, Rajaram H. Predicting dissolution patterns in variable aperture fractures: Evaluation of an enhanced depth-averaged computational model[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): 1-14.
- [49] 刘再华, Dreybrodt W. DBL理论模型及方解石溶解、沉积速率预报[J]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 1-7.
LIU Zaihua, W. Dreybrodt. The DBL model and prediction of calcite dissolution/precipitation rates[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(1): 1-7.
- [50] Wang L, Cardenas M B. Linear permeability evolution of expanding conduits due to feedback between flow and fast phase change[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4116-4123.
- [51] SUN Liwei, NIU Jie, Hu B X, WU Chuanhao, DAI Heng. An efficient approximation of non-Fickian transport using a time-fractional transient storage model[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 135: 103486.
- [52] 毛亮, 于青春, 王敬霞, 李洪辉, 赵帅维, 贾梅兰. 降雨对裂隙型岩溶含水系统演化影响的数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 42-48.
MAO Liang, YU Qingchun, WANG Jingxia, LI Honghui, ZHAO Shuaiwei, JIA Meilan. Numerical simulation of precipitation impact on fractured karst system evolution[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 42-48.
- [53] 王云, 于青春, 薛亮. 溶蚀作用下古岩溶盆地系统中介质场演化模拟[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 1007-1015.
WANG Yun, YU Qingchun, XUE Liang. Simulation of the media field evolution in palaeo-karst basin system under the dissolution[J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 1007-1015.
- [54] Liedl Rudolf, Sauter Martin, Hückinghaus Dirk, Clemens Torsten, Teutsch Georg. Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3): WR001206.
- [55] Bauer S, Liedl R, Sauter M. Modeling the influence of epikarst evolution on karst aquifer genesis: A time-variant recharge boundary condition for joint karst-epikarst development[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41: W09416.

- [56] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 1-47.
WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1-47.
- [57] 陈喜, 宋琪峰, 高满, 孙一萌. 植被-土壤-水文相互作用及生态水文模型参数的动态表述[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52: 362-368.
CHEN Xi, SONG Qifeng, GAO Man, SUN Yimeng. Vegetation-soil-hydrology interaction and expression of parameter variations in ecohydrological models[J]. *Journal of Beijing Normal University(natural science)*, 2016, 52: 362-368.
- [58] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, Lange J, Weiler M. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modelling approaches[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 52: 218-242.
- [59] White W B. Karst hydrology: Recent developments and open questions[J]. *Engineering Geology*, 2002, 65: 85-105.
- [60] Hartmann A, Weiler M, Wagener T, Lange J, Kralik M, Humer F, Mizyed N, Rimmer A, Barberá J A, Andreo B, Butscher C, Huggenberger P. Process-based karst modelling to relate hydrodynamic and hydrochemical characteristics to system properties[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8): 3305-3321.
- [61] Chen Xi, Zhang Zhicai, Soulsby Chris, Cheng Qinbo, Binley Andrew, Jiang Rui, Tao Min. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: An integrated approach[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32:2932-2946.

An overview on the development of science and ecological hydrology of the earth critical zones in karst area

CHEN Xi¹, ZHANG Zhicai²

(1. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract In view of the evolution history of ecology and environment in karst area of southwest China and the challenges under the new situation, in this paper, the results of observation experiments on vegetation, hydrology, soil and dissolution test in three stages of vegetation degradation, artificial restoration and natural succession are systematically summarized, the development and existing problems of karst eco-hydrological model are expounded. The structure and composition of the atmosphere-vegetation-soil-rock system and the concept of co-evolution in karst area are put forward based on the scientific system thinking of the earth critical zones and the multidisciplinary comprehensive research paradigm. The research approaches of the co-evolution of eco-hydrology and carbon, water, and calcium cycles are discussed from the perspective of interdisciplinary, systematic observation and model integration. Based on this, this paper puts forward suggestions to promote the development of karst eco-hydrology, so as to provide scientific support for the restoration of ecology and environment in karst area under the situation of global climate change and green development.

Key words earth critical zone, karst, epi-karst zone, ecological hydrology, green development, overview

(编辑 张玲)