

doi: 10.12029/gc20170504

曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 夏日元, 章程. 2017. 岩溶动力系统与全球变化研究进展[J]. 中国地质, 44(5): 874–900.

Cao Jianhua, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Xia Riyuan, Zhang Cheng. 2017. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years[J]. Geology in China, 44(5): 874–900(in Chinese with English abstract).

岩溶动力系统与全球变化研究进展

曹建华 蒋忠诚 袁道先 夏日元 章程

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要:碳酸盐岩是岩溶发育的物质基础,它记录着地球历史时期的环境变化,是地球最大的碳库,对地球大气和生命演变起到重要作用;现代全球岩溶分布面积 2200 万 km²,占陆地面积的 15%,岩溶动力系统是地球表层系统的重要组成部分,全球 25%的人口依赖岩溶地下水资源的供给,岩溶生态系统的脆弱性制约着区域经济社会发展;本文主要针对近 30 年以来,岩溶学科发展进行综述,包括岩溶动力学概念、内涵与发展,驱动岩溶发育的地质-生态机制,岩溶动力系统与碳循环新进展,岩溶动力系统与水循环新进展,岩溶动力系统与钙循环新进展;岩溶动力系统与全球环境变化研究发展展望(岩溶关键带下的资源环境效应及国际大科学计划的启动)。

关键词:岩溶动力学;岩溶关键带;驱动机制;新进展;岩溶区资源环境

中图分类号:P642.25 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)05-0874-27

The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years

CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, XIA Riyuan, ZHANG Cheng

(*Institute of Karst Geology, CAGS; Karst Dynamics Laboratory, MLR; International Research Center on Karst, UNESCO; International Joint Research Center on Karst Dynamic System, MOST, Guilin 541004, Guangxi, China*)

Abstract: Carbonate rock is the material basis of karst development. It recorded some environmental changes, stored most carbon and played an important role in the primitive atmosphere and life evolution during the earth evolution. Karst covers 22×10^6 km² of the whole world, possessing ~15% of the continent surface. The effects of the karst process on climate and environmental changes are considerable, and hence the karst dynamic system (KDS) is an important component of the Earth's Surface System. In this paper, the authors made a review on the progress of the karst science in the past 30 years, which includes the conception, intention and development of the karst dynamics, geological and ecological mechanisms of driving the KDS, and some new results and

收稿日期:2017-09-12;改回日期:2017-10-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502500)、国家自然科学基金重点项目(41530316)、中国地质调查局“全国地质环境创新工程”、IGCP-661“岩溶关键带过程、物质循环和资源环境可持续”(2017-2021)资助。

作者简介:曹建华,男,1963年生,博士,研究员,土壤学专业,主要从事岩溶生态地质、岩溶碳循环及石漠化综合治理等方面的基础、应用基础研究;E-mail:jhcaogl@karst.ac.cn。

findings in the fields of KDS and carbon cycle, water cycle and calcium cycle. Finally, the karst critical zone and global karst was introduced.

Key words: karst dynamics; karst critical zone; driving force and mechanism; progress; resources and environment of karst area

About the first author: CAO Jianhua, male, born in 1963, doctor, majors in the basic and applied fundamental research on karst ecosystem, karst carbon cycle and rocky desertification integrated treatment; E-mail: jhcaogl@karst.ac.cn.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFC0502500), Key Project of National Natural Scientific Foundation of China (No. 41530316), Innovational Program on Geological Environment of China Geological Survey, and IGCP project 661 entitled "Processes, Cycle, and Sustainability of the Critical Zone in Karst Systems"

1 引言

碳酸盐岩是岩溶发育的物质基础,地质历史时期碳酸盐岩的形成是大气提供了碳、硅酸盐岩风化提供了钙、镁,而生物则催化、调控了其形成过程(刘志礼, 1990; Fairbridge, 1978),导致原始地球大气 CO_2 浓度从25%以上(谢树成等, 2011),降低到现代大气的0.03%~0.04%,对地质历史时期大气 CO_2 产生巨大碳汇效应,储存在碳酸盐岩中的碳达 6.1×10^{16} t (Falkowski et al., 2000),分别是海洋和陆地植被碳库的1562倍和 3.0×10^4 倍(曹建华等, 2011),是现代地球上最大的碳库,其碳量占全球总碳量的99.55%。现代碳酸盐岩在全球的分布面积达到2200万 km^2 ,约占陆地面积的15%(袁道先, 1997),中国岩溶面积达344万 km^2 ,约占全球岩溶总面积的15.6%(李大通, 1985),岩溶作用深刻的影响着全球变化。本文依据近30年的岩溶研究发展,尤其中国岩溶科学家袁道先院士及其团队,成功地连续6次获得联合国教科文组织与岩溶相关的国际计划,在中国国家自然科学基金委员会、国土资源部中国地质调查局、科技部等部门的持续大力支持下,取得新的进展。

2 岩溶动力学概念、内涵与发展

20世纪80年代后期,地球系统科学在岩溶地质研究中得到应用,并随着1990年IGCP299“地质、气候、水文与岩溶形成”国际地质对比计划的成功获批和执行以来,从全球视野,创新地提出岩溶动力学理论,将岩溶研究从传统的地质、地貌学科领域,纳入到影响区域经济社会发展的、综合的地球系统科学轨道,其发展过程大致经历三个阶段。

第一阶段:1990—1999年,将地球系统科学引

入岩溶,从全球视野提出地球系统科学的岩溶观(袁道先, 1993)和岩溶动力系统概念(Yuan, 1997),强调岩溶作为一个地质体(岩石圈)与地球表层系统其他圈层之间的关系,岩溶动力系统是一个与碳循环耦合的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_3^{2-}$ 系统,是对环境变化响应极其敏感的三相不平衡开放系统(图1)(袁道先, 1995)。

研制一套与敏感岩溶动力系统相适应的、便携式的野外现场监测技术体系,形成能捕捉岩溶动力系统中运行着的碳、水、钙行踪的岩溶地球化学方法。

明确岩溶动力系统具有4个主要功能:(1)驱动岩溶形成;(2)调节大气温室气体,缓解环境酸化;(3)驱动元素迁移,形成矿产,影响生物多样性和人体;(4)记录环境变化(袁道先, 1998)。

通过国际对比(IGCP299),提出了中国大陆岩溶研究的四大地域优势:坚硬古老碳酸盐岩;新生代大幅度抬升;季风区水热配套;未受末次冰期大陆冰盖刨蚀。

第二阶段:2000—2009年,通过第一阶段的实

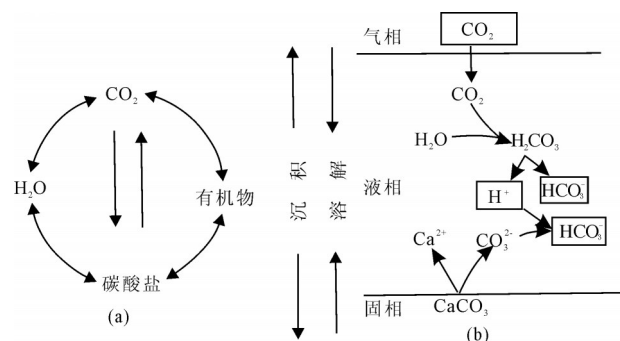


图1 碳循环(a)与岩溶动力系统(b)(袁道先, 1993)

Fig.1 Carbon cycle (a) and karst dynamic system (b)(after Yuan, 1993)

践,尤其在实践中发现的科学问题,明确岩溶动力学是研究岩溶动力系统结构、运行特征、功能的科学(袁道先, 2009),岩溶动力系统可定义为控制岩溶形成演化,并常受制于已有岩溶形态的,在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈界面上的,以碳、水、钙循环为主的物质、能量传输、转换系统(袁道先等, 2002;袁道先等, 2008a)(图2)。

岩溶动力系统系统中的固相部分为各种以碳酸盐岩为主的岩石及其中的裂隙、孔隙和管道网络,与整个岩石圈联系,而且还通过现代活动断裂与地幔联系,使深源CO₂得以积极参与岩溶动力系统的运行;液相部分为Ca²⁺(Mg²⁺),HCO₃⁻,CO₃²⁻,H⁺和溶解CO₂为主要成分的水流,实际上是全球水圈的一部分,它不但是岩溶动力系统的枢纽,而且通过它与生物圈、人类活动、大气圈联系,使它们积极参与岩溶作用(溶蚀或沉淀);气相部分则为以CO₂为主的各种参与岩溶作用的气体,属于大气圈的组成部分,也通过气体CO₂交换和生物圈、岩石圈及人类活动密切联系(光合作用、石灰的烧制、水泥的固化等),使它们积极参与岩溶动力系统的运行。

岩溶动力系统是一个开放系统,其边界既受制于已有的地表、地下岩溶形态系统,又与地球四圈层有密切联系。

并从物理化学、生物角度深入研究和发展了岩溶水文地球化学(袁道先等, 2008b)。如碳酸盐岩的溶解速率由岩石表面上的非均相化学反应、离子从

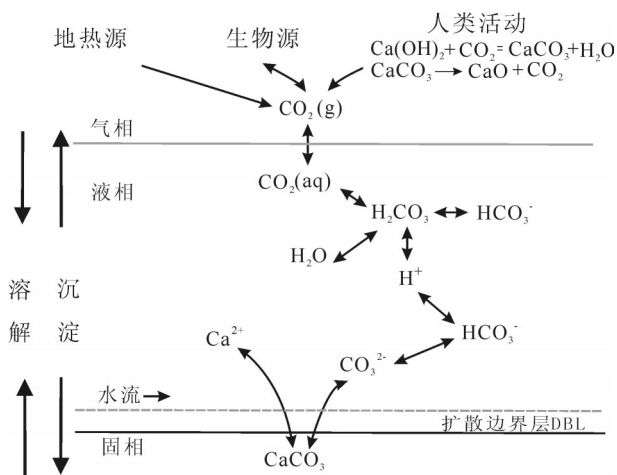


图2 岩溶动力系统概念模型(袁道先等, 2002)

Fig.2 Conceptual model of the karst dynamic system(after Yuan et al., 2002)

岩石表面通过扩散向溶液中的传输、CO₂向H⁺和HCO₃⁻的转换3个慢过程所控制(刘再华, 2007),室内旋转盘模拟实验结果(图3),发现白云岩的初始溶解速率比石灰岩显著偏低,前者仅为后者的1/3至1/8,且CO₂分压愈低,两者差异愈大;加入能催化溶液中CO₂转换的碳酸酐酶后,石灰岩溶解速率在高CO₂分压时,如在P_{CO₂}=1atm条件下,加入碳酸酐酶后石灰岩溶解速率在高CO₂分压时增加10倍,而白云岩溶解速率在低CO₂分压时增加3倍(刘再华等, 2006)。

第三阶段:2010年至今,面临固碳增汇、应对全球气候变化,及脆弱岩溶生态环境恢复重建、生态系统功能提升等方面的需求,破解制约岩溶区资源环境瓶颈的挑战,如2011年Science期刊刊登了岩溶碳汇的全球意义(Larson, 2011)文章后,就有不同学者提出质疑,认为岩溶碳汇仅是发生碳转移、而不是发生碳汇,为此,岩溶动力系统的结构组成和内涵进一步得到扩展和补充。

在岩溶动力系统结构组成中(图4),强化了陆地、水生生态过程在岩溶动力系统中的作用和地位,气相CO₂源补充了植被-土壤等生态源,液相的碳形态研究方面,补充了水生植物的光合作用,及有机碳(Cao et al., 2016)。

从同位素、有机地球化学角度,完善了岩溶地球化学技术体系。尤其是对无机、有机碳的来源、

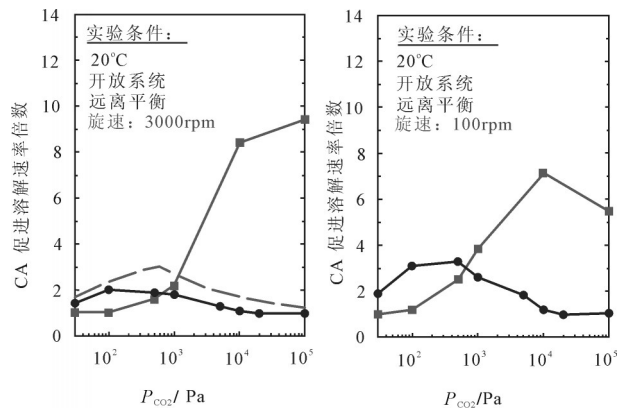


图3 石灰岩、白云岩溶蚀差异性对比实验(刘再华, 2006)

转速3000 rpm(图左)和100 rpm(图右)

添加CA(碳酸酐酶)石灰岩增加溶蚀速率主要发生在CO₂分压>100 Pa、白云岩主要发生在CO₂分压CO₂<10 000 Pa条件下

Fig.3 Comparison of the limestone and dolomite for the dissolution rate versus pCO₂ at the rotating speeds of 3 000 r min⁻¹ (a) and 100 r min⁻¹(b) (after Liu et al., 2006) Addition of CA increases the dissolution rates mainly at pCO₂> 100 Pa for limestone, and pCO₂< 10 000 Pa for dolomite

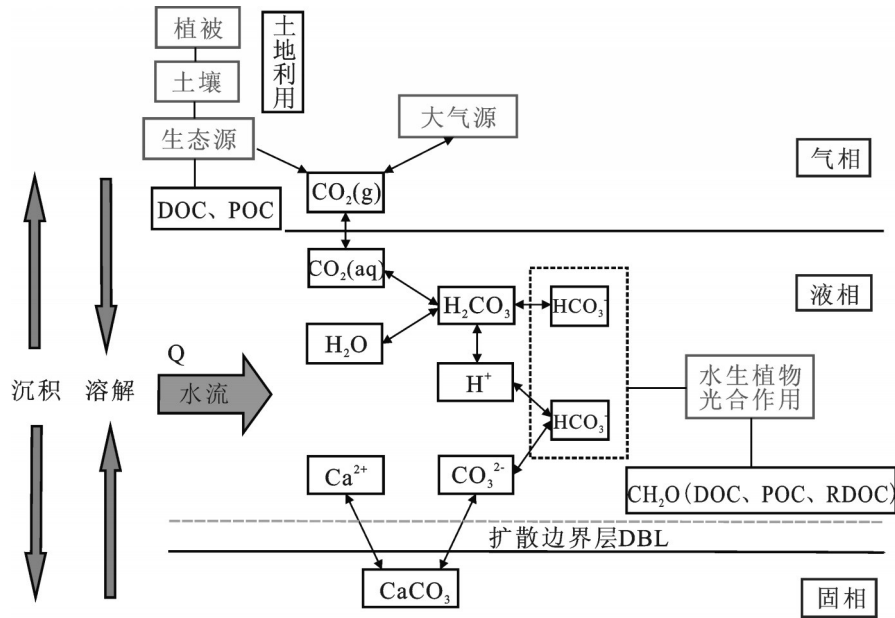


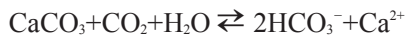
图4 岩溶动力系统结构及碳循环源汇关系(Cao et al., 2016)

Fig.4 Structure of the karst dynamic system and carbon source and sink related to carbon cycle(after Cao et al., 2016)

转化、去向进行甄别鉴定,建立流域尺度岩溶碳循环模式。

3 驱动岩溶动力系统的地质-生态机制

岩溶动力系统运行的基本化学反应方程式是一个简单的溶解-沉积的可逆反应:



从反应式中,可以看出,CO₂和H₂O是其驱动力,反应的对象是碳酸盐岩,是一个典型的水-岩相互作用过程,但与此同时,CO₂和H₂O也是生物生态系统的驱动力,因此,在地球表层系统中,岩溶动力系统与生物生态系统具有密切关系(Cao et al., 2016;曹建华等,2001)(图5)。

岩溶作用是一种快速动力学过程(Golubic et al., 1978),在开放系统条件下,当CO₂分压分别达到0.03%(大气CO₂)或1%(土壤CO₂)时,方解石溶解达到溶解平衡的时间分别为1h或6h(章程,2011a),而方解石达到溶解平衡时的浓度随着周围环境中CO₂浓度的增加而显著增加,可从55 mg/L(P_{CO₂}=0.03%)、150 mg/L(P_{CO₂}=0.3%)、到300 mg/L(P_{CO₂}=3%)(Merkel et al., 2005)。

岩溶动力系统运行主要是碳酸盐岩溶解、沉

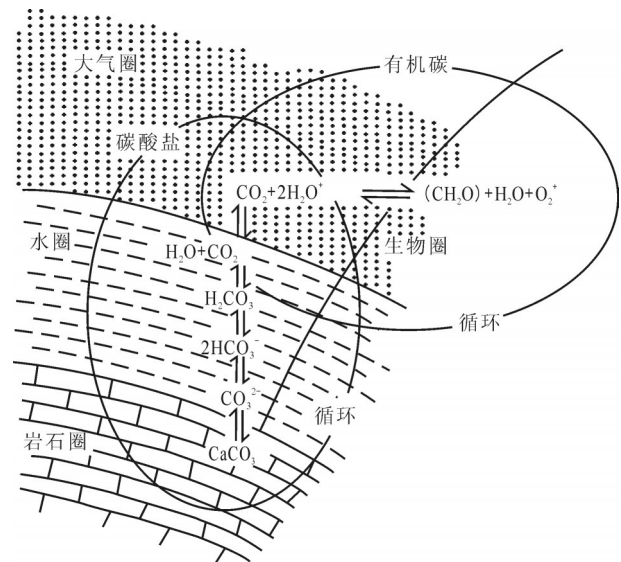


图5 岩溶动力系统与生物生态系统相同相耦合(据 Golubic et al., 1978)

Fig.5 Relationship between the karst dynamic system and ecosystem related to carbon cycle (after Golubic et al., 1978)

积,其运行的快慢主要取决于2个方面的因素:(1)CO₂和H₂O的活跃程度;(2)碳酸盐岩溶解、沉积过程的快慢。

在同一气候条件下,影响前者的主要是生物生态作用和过程,影响后者的除了生物生态作用和过

程,还有地质因素。在同一系统中,地质和生态两方面存在相互作用、相互影响和相互融合。

以下主要从碳酸盐岩的溶解过程,对地质-生态对其驱动机制进行论述。

3.1 地质驱动机制

碳酸盐岩是岩溶动力系统组成的物质基础,碳酸盐岩是可溶岩,在 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 中可发生溶解,但溶解的快慢取决于岩石的结构和组成。碳酸盐岩按照成分组成可分为两大类岩石-石灰岩和白云岩,它们之间因矿物结晶程度、矿物组成差异、酸不溶物含量多少,存在一系列的过渡类型(刘宝珺,1980)。聂跃平(1994)的研究结果显示,纯石灰岩的比溶蚀度(0.93~0.97)是纯白云岩(0.50~0.66)的两倍。

另外,构造运动产生的可透水裂隙集中分布带,是碳酸盐岩溶解容易发生的部位(陈宏峰等,2016;邱书敏,1980)。

区域地质构造运动,是不同岩溶形态塑造的前提和基础(陈宏峰等,2016;邱书敏,1980)。

水文地质驱动机制:根据碳酸盐岩溶解反应的平衡常数与温度关系,表明白云石在一定温度下,充分溶解、达到平衡时溶出的质量高出方解石,但其溶解反应速度是缓慢的,换言之,白云岩的抗风化能力强,而石灰岩易溶解。因此,当水流先遇到白云岩地层,并达到溶解平衡(饱和),然后再遇到石灰岩地层,会出现两种情况:水温低于 10°C 时,会产生 CaCO_3 沉淀,水流不再具有继续溶解石灰岩的能力;水温高于 10°C 时,石灰岩可以继续发生溶解(沈照理等,1993)。

而相反的水流过程,当水流先遇到石灰岩地层,并达到饱和平衡后,然后再遇到白云石地层区,因白云石的溶解度大于方解石,会继续发生溶解,产生更多的 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 离子,但与此同时,因方解石过饱和,从而发生 CaCO_3 沉淀,而白云石继续溶解,溶液中,相对 Ca^{2+} 而言, Mg^{2+} 不断富集(沈照理等,1993)。

水力坡度的大小、水流速度的快慢,影响水-碳酸盐岩界面上的扩散边界层的厚度,从而影响碳酸盐岩的溶解速度(刘再华等,1998)。

3.2 生态驱动机制

生物生态过程驱动碳酸盐岩溶解主要有直接作用和间接作用。

直接作用。生物直接殖居在碳酸盐岩上,通过生物体与碳酸盐岩间发生的生物地球化学过程(图6),发生的溶解过程。如藻类在坚硬的石灰岩雕像上620年可形成1.1 cm深的藻类溶孔,其钻孔溶蚀速率达到区域综合化学溶蚀速率的20%(曹建华等,1993);壳状内生地衣生物岩溶样品与相应岩石样品的对比溶蚀试验,结果表明因地衣殖居可使碳酸盐岩溶蚀速率提高26%~64%(Cao et al., 1998);由于岩溶区土壤稀薄,很多高大的乔木直接生长在岩石上,其根(系)钻蚀于碳酸盐岩中,桂林岩溶区调查的结果显示,黄连木、圆叶乌桕的根系可在碳酸盐岩中向下延伸29 m,而对贵州茂兰岩溶森林区直接生长在岩石上植物根钻蚀产生碳酸盐岩溶蚀量,估算为 $4.41\times 10^4 \text{ kg/km}^2\text{a}$ (曹建华等,2001),与区域综合化学溶蚀速率($10.69\times 10^4 \text{ kg/km}^2\text{a}$ (李彬等,1996)同处一个数量级。

间接作用。生物的新陈代谢过程,如光合-呼吸作用、植物耗水过程,对微环境、小环境、区域环境中 CO_2 和 H_2O 动态的影响,进而影响碳酸盐岩的溶解。微生物作为生态系统中的分解者,是生态系统中 CO_2 的主要“制造者”,微生物主要存在于土壤中,因此,土壤中 CO_2 浓度比大气 CO_2 浓度高出1~2个数量级,而土壤覆盖下的碳酸盐岩的溶蚀速度是地面的4.35倍(朱明秋等,2007);同位素示踪的结果显示,碳酸盐岩溶解风化的碳源,除碳酸盐岩中碳之外,其他主要来源于土壤(何师意等,2000)。低等植物殖居碳酸盐岩浅表层,并将浅表层改造成疏松多孔层(0~2 mm),提高碳酸盐岩的持水量(曹建华等,1999),延长水岩相互作用时间的同时,刺激低等植物的光合-呼吸作用,提高碳酸盐岩的溶蚀速率(Cao et al., 1998);广西的打狗河东岸林地所占比例(55.99%)是西岸的(19.80%)2.83倍,强烈的蒸腾蒸发作用导致东岸径流模数(18.98 L/s.km^2),仅为西岸的(32.92 L/s.km^2)的60.60%,但东岸产生的岩溶无机碳汇通量比西岸的高出14%(覃小群等,2011)。

碳酸酐酶是生物适应岩溶环境并加速 CO_2 溶于 H_2O 慢反应等制约碳酸盐岩溶解的催化剂(李西腾等,2005)。

Li et al.(2005)对岩溶区不同植被覆盖程度土壤CA活性研究发现,植被覆盖好的弄拉和金佛山岩溶区的表层土中平均CA活性为3.83 U/g和3.13 U/

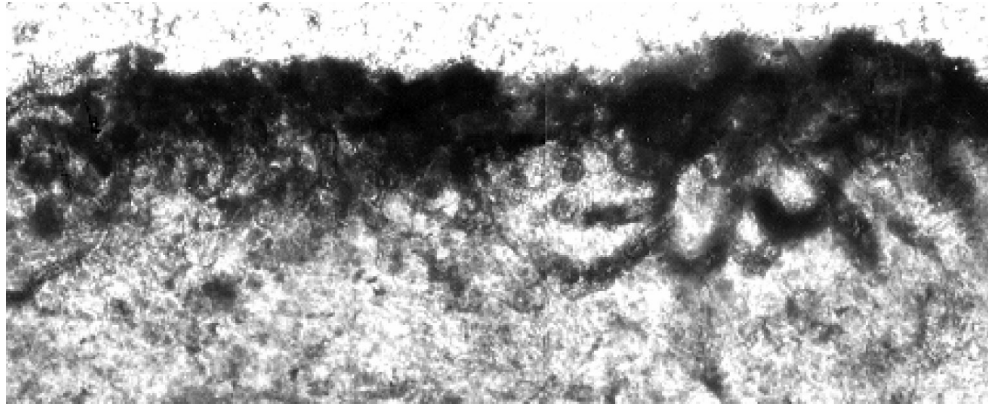


图6 球状藻类对碳酸盐岩浅表层改造(曹建华等,2001)

Fig.6 Subsurface of carbonate rock reformed by the spherical algae(after Cao et al., 2001)

g, 大于植被覆盖稍差的桂林表层土土壤CA活性(2.61 U/g)和石漠化严重的六盘水平均土壤CA活性(0.02 U/g),这些揭示植物根系和土壤微生物可能是CA的重要来源。微生物及其胞外CA不仅对石灰岩溶解具有显著促进作用(Li et al., 2009),石灰岩加速溶解的同时,提高成土速率,增强岩溶碳汇效应(李强等,2011;何媛媛,2010)。

4 岩溶动力系统与碳循环研究新进展

4.1 岩溶碳循环的路径及影响因子不断被发现

4.1.1 植被正向演替对岩溶碳汇具有显著促进作用

广西马山弄拉和重庆金佛山典型岩溶泉域的研究结果表明,不同土地利用下的土下溶蚀速率差异明显,耕地、灌丛、次生林、草地、原始林溶蚀速率平均值分别为4.02,7.0,40.0,20.0和63.5 t/(km².a),

从灌丛到次生林地再到原始林地,岩溶作用产生的碳汇通量可增加2~8倍(章程等,2006;章程,2011)。

而控制边界的模拟试验,设计树箱(乔木-土壤-碳酸盐岩)、草箱(草-土壤-碳酸盐岩)、土箱(土壤-碳酸盐岩)三种体系,进行对比,其结果显示:树箱体系中因乔木强烈光合作用带动土壤碳循环强度的增加、同时茂盛的树冠可获得更多降雨,使土下碳酸盐岩侵蚀能力加强,其产生的岩溶碳汇通量分别是草箱、土箱体系的1.36倍、2.84倍(曹建华等,2004)(图7)。随植被正向演替,地表生态系统增汇过程发生的同时,地下同步发生类似的岩溶增汇过程。

4.1.2 土壤碳循环对比监测调查揭示,土下碳酸盐岩溶解消耗土壤中25%的CO₂

桂林毛村岩溶碳循环过程野外试验场,其地下河流域补给区面积11.2 km²,其中岩溶面积7.6 km²,

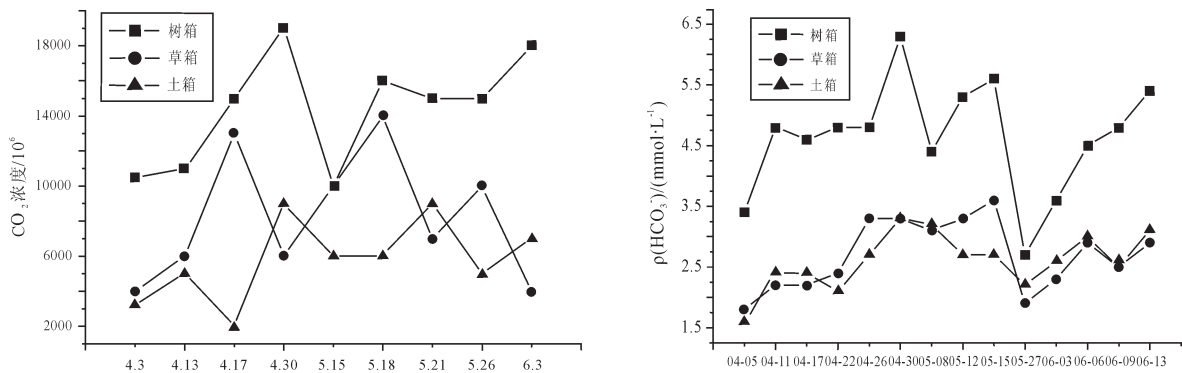


图7 树箱、草箱和土箱土下20 cm处CO₂排出水中HCO₃⁻浓度对比(曹建华等,2004)

Fig.7 Dynamics of soil CO₂ concentration 20cm under soil, HCO₃⁻ concentration of the leaching water among the tree-soil, grass-soil and bare soil systems(after Cao et al., 2004)

非岩溶区面积3.6 km²,同时具有碳酸盐岩风化形成的石灰土和砂岩风化形成的红壤,选择相距1 km的1 m的土壤剖面,开展土壤剖面不同层位CO₂浓度和土壤呼吸长期监测,结果显示(曹建华等,2011):

岩溶区石灰土的土壤呼吸排放CO₂速率明显低于碎屑岩区红壤的,岩溶区土壤呼吸速率的变化幅度为23.12~271.26 mgC/(m²·h);碎屑岩土壤呼吸速率的变化幅度为51.60~326.28 mgC/(m²·h),如以年平均值计算,则岩溶区土壤呼吸排放CO₂的量要比碎屑岩区红壤少25.12%(图8)。

岩溶区石灰土土壤呼吸排放CO₂的δ¹³C值比碎屑岩区红壤的偏重,岩溶区土壤呼吸排放CO₂的δ¹³C值为-29.35‰~-18.26‰,平均为-22.68‰,碎屑岩区为-29.21‰~-22.60‰,平均为-26.21‰;表明石灰土中CO₂具有来自碳酸盐岩的重碳组分。

岩溶区石灰土剖面中CO₂浓度出现双向梯度,且水热条件良好的季节双向梯度表现更明显;而碎屑岩区红壤剖面中CO₂浓度随土壤层深部的增加而增加的单向梯度;揭示了土下碳酸盐岩溶解大量消耗土壤空气CO₂。

4.1.3 在线监测揭示降雨事件对岩溶碳汇具激发效应

桂林毛村地下河在线监测结果显示(黄芬等,2014),2010年6月出现3场较为集中的降雨:13日降雨量为33 mm,14日降雨量62.5 mm,16日降雨量为88.5 mm。第一场降雨,地下河中HCO₃⁻含量滞

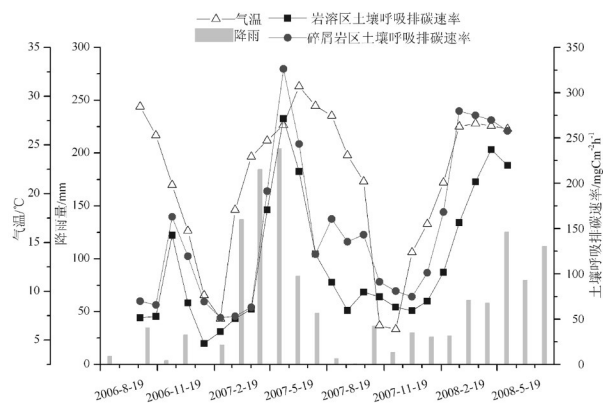


图8 桂林毛村岩溶区石灰土与碎屑岩区红壤土壤呼吸排碳动态对比(曹建华等,2011)

Fig.8 Comparison of soil respiration change between limestone soil and red soil, Maocun, Guilin(after Cao et al., 2011)

后4个小时达到最大,岩溶碳汇通量由 5.54×10^3 gC/s上升到 5.57×10^3 mgC/s;第二、第三场降雨,分别滞后于3.2小时、3.5小时,而碳汇量分别增加到 9.98×10^3 mgC/s、 8.73×10^3 mgC/s。

每场降雨过后,水的二氧化碳分压(P_{CO_2})都呈现出升高趋势,方解石饱和指数(SIc)与二氧化碳分压 P_{CO_2} 的变化趋势正好相反:降雨时,高浓度二氧化碳溶入水中,使水更具有侵蚀性,溶解碳酸盐岩,使得水的二氧化碳分压 P_{CO_2} 升高,水岩相互作用致使地下水中HCO₃⁻含量升高(图9)。

4.1.4 外源水输入岩溶区,提高岩溶水的侵蚀力,增加岩溶碳汇通量

桂林毛村岩溶地下河流域岩溶碳循环试验场,补给面积11.2 km²,其中岩溶区、非岩溶区面积分别为7.6 km²和3.6 km²,以砂岩为主的非岩溶区位于补给区的上游,外源水向岩溶区补给;典型岩溶泉背地补给区面积1 km²,典型外源水溪流小龙背补给区面积1.5 km²,无机碳碳汇通量强度分别为2.64 t CO₂/kma和31.50 t CO₂/kma;外源水补给岩溶区,与岩溶水混合,提高了岩溶水的溶蚀能力,从上游至下游,随着水岩相互作用的持续,水体中的DIC含量不断升高,其碳酸盐饱和指数也逐渐增加,SIc由不饱和达到饱和,提高了岩溶碳汇的强度(图10),2010年4月至2011年3月,于地下河流域上游的小龙背到地下河出口,岩溶碳汇通量由 2.28×10^6 g增加至 2.04×10^6 g,增加了近10倍,外源水的输入,增加岩溶碳汇通量34%(黄芬等,2011)。

4.1.5 地下岩溶洞穴空气中CO₂浓度变化具周期性

中国南方54万 km²的裸露碳酸盐区洞穴密度0.8个/km²(陈伟海,2006),已经查明的地下河数达到2836条(袁道先,2000;杨立铮,1985)。它们不仅是水运移、储存、缓冲调蓄的部位,同时也是追踪岩溶碳循环的有利部位。桂林盘龙洞洞穴空气CO₂监测的结果显示,洞穴空气CO₂浓度变化具有周期性(图11),CO₂分压要比洞外大气CO₂分压要高得多,这表明含有高浓度HCO₃⁻的岩溶水,沿包气带岩溶介质中的裂隙、溶隙运移至洞穴中,因温度、压力和水动力条件的改变,水体中HCO₃⁻转化为游离CO₂,并逸出,洞穴CO₂浓度,与地表土壤CO₂浓度、地下水中HCO₃⁻动态变化存在对应关系(刘再华等,2000;Liu et al., 2004),

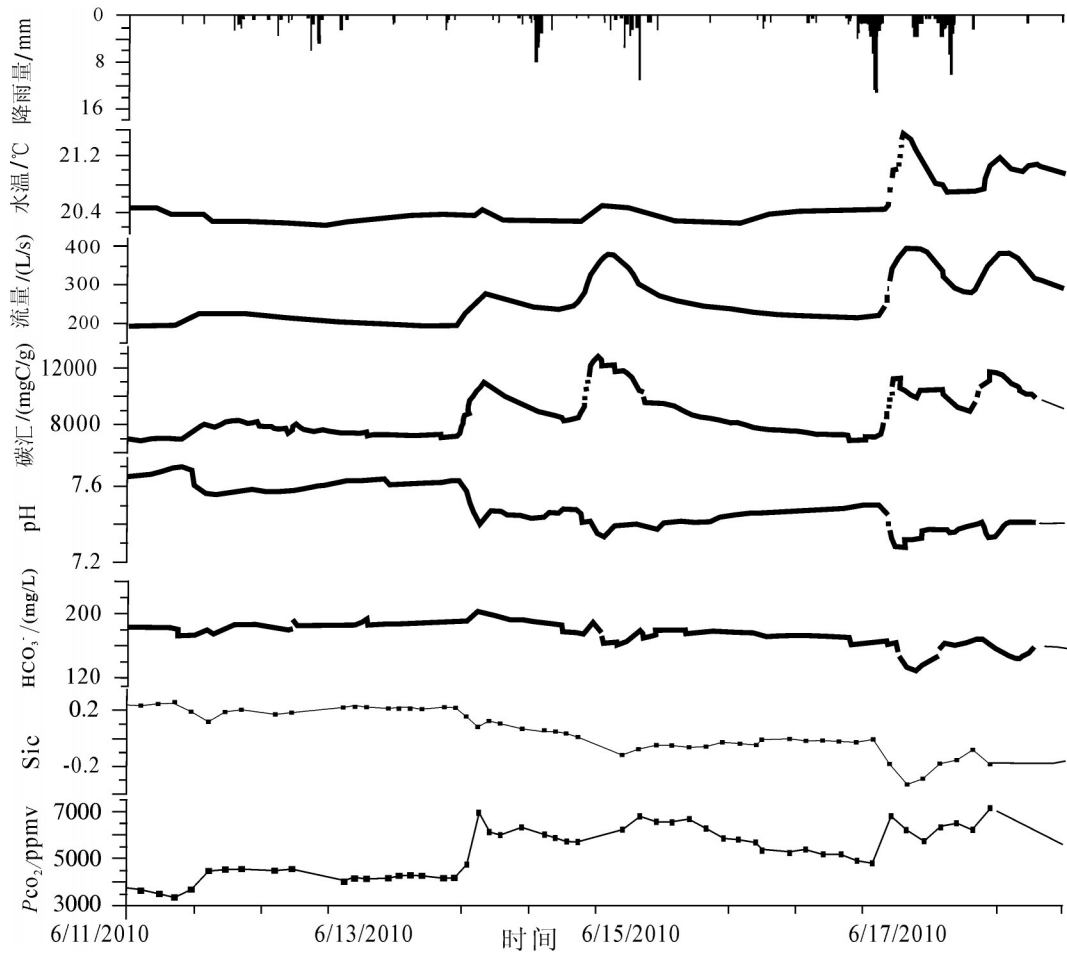


图9 桂林毛村岩溶碳循环试验场岩溶碳汇指标对降水事件的响应(黄芬等,2014)

Fig.9 Indicators of karst carbon cycle responding to precipitation at the Maocun Karst Experimental Site, Guilin (after Huang et al., 2014)

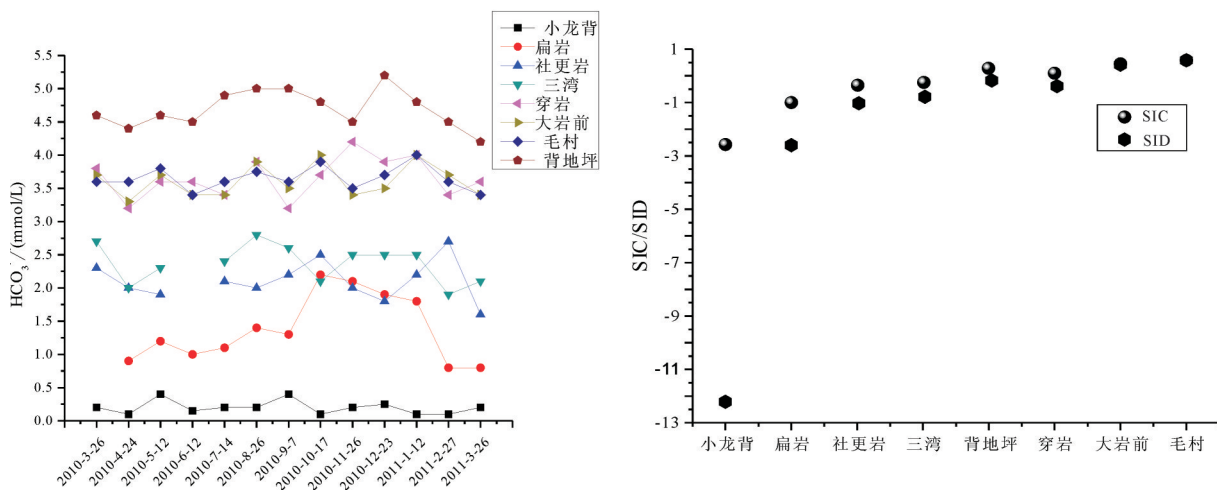


图10 桂林毛村外源水输入岩溶区,水体中DIC、Sic时空动态变化(黄芬等,2011)

Fig. 10 Space and time changes of water DIC, Sic when the allogenic water flows to karst area in Maocun karst watershed, Guilin (after Huang et al., 2011)

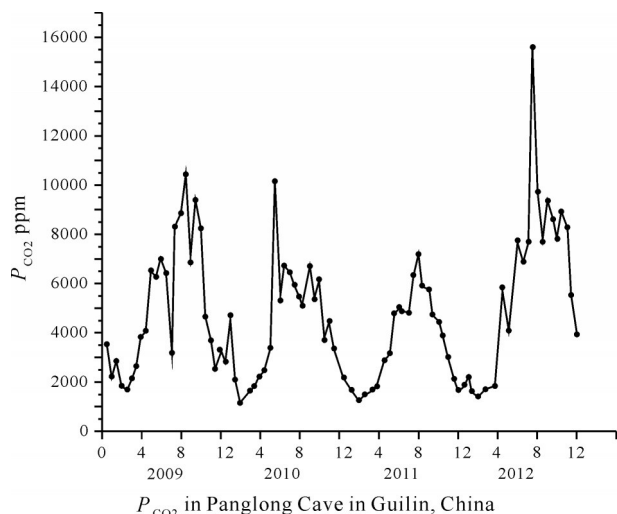


图 11 桂林盘龙洞(包气带洞穴)中空气 CO_2 分压动态变化
(Cao et al., 2016)

Fig.11 Changes of the CO_2 concentration of cave air in Panlong Cave (the cave development in vadose zone), Guilin (after Cao et al., 2016)

表现出明显的季节和多年变化。

4.1.6 水生植物光合作用将岩溶水体中无机碳转化为有机碳,岩溶地质碳汇与生态碳汇融合

水体是携带 HCO_3^- 迁移的主要载体,岩溶水体中的 HCO_3^- 含量通常达到3~5 mmol/L,比外源水体中的要高出1个数量级;电导率通常达到300~500 us/cm,比外源水高出1~2个数量级;典型岩溶水的pH值也通常比典型外源水的高出1~2个单位。

在水生生态系统中,挺水植物在光、水和 CO_2 充足,具有较陆生植物更高的初级生产力,而沉水植物受到水下光照条件和碳源的制约(吴振斌等, 2011),高浓度 HCO_3^- 的岩溶水则提供了丰富的碳源,可刺激大量水生植物滋生,使无机碳向有机碳的转化。

王培等(Wang et al., 2014)发现而土著小球藻能将40.625%的 HCO_3^- 通过其在食物链中的初级生产将岩溶无机碳汇转化成水生生态系统中有有机碳;在桂林潮田岩溶地下河出口至潮田河间有一条512 m的寨底河,河水中沉水植物繁盛,从上游至下游取4种优势植物:海菜花、苦草、竹叶眼子菜和黑藻,测定其碳同位素,发现逐渐变重(图 12),因为,沉水植物被迫吸收越来越重的无机碳;通过溶解氧和 HCO_3^- 浓度和无机碳通量的计算,岩溶地下水出露地表,经由512 m寨底河后,有12.52%的无机碳转化为有机碳(Wang et al., 2017)。

章程等发现广西柳州官村地下河出口1.35 km河道内,沿途 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 含量显著减少,存在 HCO_3^- 的丢失和Ca的原位沉降,由于水生植物所消耗的DIC达1153 mmol/day/m,同位素结果显示水生植物体生物量的88%源于水体中 HCO_3^- (章程等, 2015; 蒋忠诚等, 2012)。

4.1.7 岩溶水体中AAPB的发现与岩溶碳汇的稳定性

岩溶作用给地下、地表水体输送了大量的无机碳给水生植物,尤其沉水植物提供了光合作用的碳源,导致一部分无机碳转化为有机碳,但生产的有机碳中赋存着能量,因此,有机碳会被微生物分解,获得其生存和生产的能量,其稳定性如何? 这是需要回答的科学问题。

好氧不产氧光合异养细菌(Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria, AAPB)是一类兼具自养和异养双重特点的功能细菌(张飞等, 2015), 它可以利用光能,能够产生ATP,实现光能向化学能的转化,但不能有效固定 CO_2 ,这可以减少细胞代谢对有机碳的消耗,使更多有机碳保存在环境中;与此同时,它又可以吸收利用活性溶解有机碳(Labile DOC)获取能量,而可供AAPB利用的DOC,主要来自水生植

表 1 桂林寨底河流域4种优势沉水植物叶片中碳同位素变化及不同点对比

Table 1 Stable carbon isotope of 4 dominant submerge plants' leaves at 6 different points in Zhaidi River, Guilin

Species	A	B	C	D	E	F
海菜花(<i>Ottelia accuminata</i>)	-40.48‰	-34.78‰	-34.95‰	-30.61‰	-34.80‰	-27.83‰
苦草(<i>Vallisneria natans</i>)	---	-35.06‰	-34.82‰	-33.32‰	-34.92‰	-25.29‰
眼子菜(<i>Potamogeton wrightii</i>)	-39.16‰	-36.56‰	-35.83‰	-33.09‰	-34.40‰	-23.70‰
黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)	---	-38.56‰	---	-34.55‰	-34.00‰	-26.32‰
据地下河出口的距离	0 m	85 m	128 m	260 m	332 m	512 m

注:“---”未采集到财税植物样品。

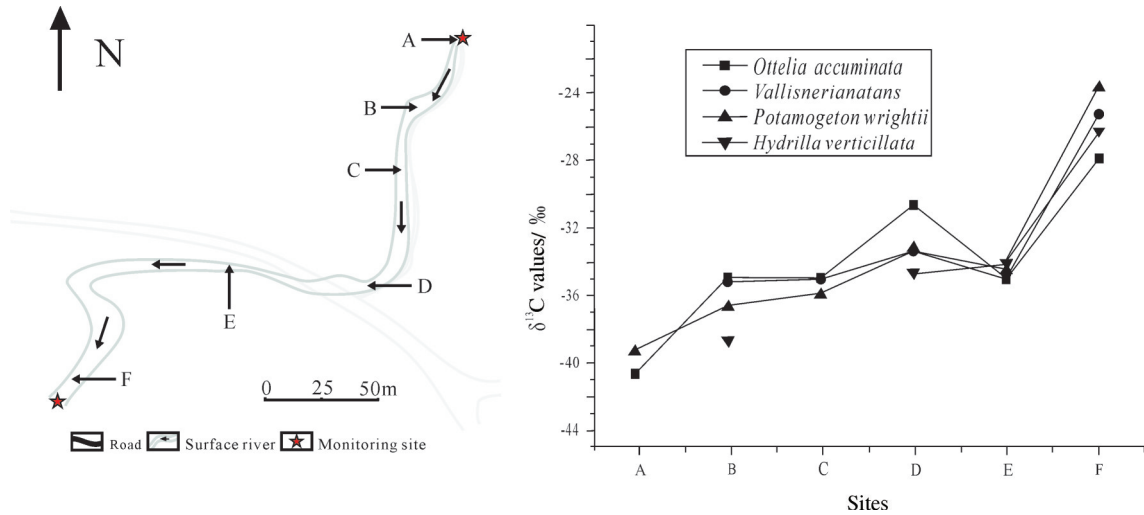


图 12 桂林寨底河示意图及 4 种优势沉水植物叶片中碳同位素变化

Fig.12 Sketch of Zhaidi River and changes of the stable carbon isotope of 4 dominant submerge plants' leaves along the river, Guilin

物(浮游植物、沉水植物等)的光合产物,同时产生相对惰性的溶解有机碳(Refractory DOC, RDOC), RDOC 可以在水体中长期保存和积累(焦念志, 2006);针对海洋环境而言,寡营养海洋中 AAPB 虽然丰度仅为 2%~4%,但其生产率却占总细菌生产率的 4%~50%, AAPB 产生的巨大的海洋 RDOC 碳库的储碳周期长达数千年(Jiao et al., 2010)。Lew et al. (2016)泥炭泥炭沼泽水体中, AAPB 的丰度与水体中的 pH、电导率呈正相关。宋昂等(2017)在 2015 年 12 月,对主要由岩溶水补给的桂林五里峡水库,经水化学组分、碳同位素及荧光定量 PCR 分析,发现水体中 AAPB 丰度 1.33%~1.60%。

4.1.8 流域尺度岩溶碳循环及碳汇效应概念模型的提出

岩溶碳循环的路径及影响因子不断被发现,对岩溶碳循环的发生、碳汇的产生的认识不断深入,从而提出流域尺度岩溶碳循环及碳汇效应概念模型,在模型中岩溶碳循环过程主要存在 3 个阶段(Cao et al., 2012):水对碳酸盐岩溶解将大气/土壤 CO₂转移到水中;富含无机碳的岩溶水在岩溶含水介质中运移;岩溶地下水出露地表成地表河时,水生植物光合作用,将岩溶水体中无机碳转化为有机碳, AAPB 将 DOC 转化为 RDOC(图 13)。

传统的基于水-岩-气相互作用的碳酸盐岩溶解风化碳汇估算中,仅考虑流域无机碳的输出,考

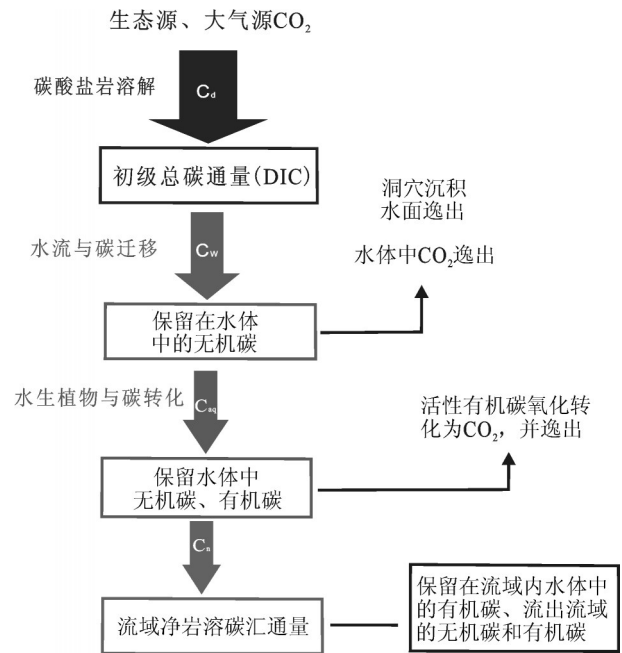


图 13 流域尺度岩溶碳循环及碳汇效应路线图(据 Cao et al., 2016 改)

Fig.13 Route diagram of karst carbon cycle and carbon sink effect (modified after Cao et al., 2016)

虑到水生植物光合作用对 DIC 的利用, AAPB 生产的 RDOC, 则流域尺度岩溶碳汇效应可表达为以下方程式:

$$CFS = F_{DIC} + F_{TOC} + F_{SOC} = 1/2 \times Q \times [DIC] \times 12 / A + 1 /$$

$$2 \times Q \times [\text{TOC}] \times 12/A + F_{\text{SOC}}$$

式中： F_{DIC} 为流域无机碳汇通量，DIC主要包括 CO_2 、 HCO_3^- ； F_{TOC} 为流域有机碳汇通量，[TOC]包括DOC、RDOC和POC； F_{SOC} 为流域有机质沉积通量。

4.2 人为干预固碳增汇的技术途径不断被发现

岩溶碳循环及碳汇效应发生的驱动力是二氧化碳和水，根据以上岩溶碳循环路径及影响因子的分析，结合图4和图13，在岩溶动力系统中可有4种人为干预、增加岩溶碳汇途径：

(1) 选择和培育适宜的植物品种。根据光合作途径和光合效率，植物可以分为光合作用效率强的 C_4 植物和相对较弱的 C_3 植物(张继谢, 2006)，选择适宜的 C_4 植物，用于岩溶区的植被恢复，不仅提高生态恢复速度，同时也可以提高植被-土壤体系中碳循环强度，进而达到人为增强岩溶碳循环和碳汇效应，因此，从增加岩溶碳汇效应角度，选择和培育适宜的植物品种是人为干预、固碳增汇的技术途径之一。

有资料数据表明，植物为了适应岩溶干旱环境，减小气孔导度或关闭气孔避免脱水，同时，提升、增强植物叶片碳酸酐酶活力，碳酸酐酶能将细胞内的 HCO_3^- 转化为 CO_2 和 H_2O ，行光合作用(吴沿友等, 2011a; 吴沿友等, 2011b)。

(2) 土壤改良，提高土壤碳循环强度。土壤生态环境中的水分、养分的状态和循环特征，不仅影响植物、农作物的生长状况，同时也刺激土壤微生物活性，增强土壤碳循环，促进土下岩溶碳汇发生(杨慧等, 2011; Liu et al., 2000)；碳酸盐岩溶解风化形成的石灰土，质地黏重，土层薄，有效水分所占比例低，因此，对岩溶区石灰土进行改良，增加其厚度，改善其水分和养分含量和有效性，是人为干预、固碳增汇的技术途径之二。

(3) 外源水的应用，增加岩溶碳循环。外源水由于其硬度和pH值较低，对碳酸盐岩具有很强的侵蚀溶解力。湖南郴州、广西桂林的典型监测研究结果显示，外源水中碳酸盐岩的溶解侵蚀速率是土下碳酸盐岩溶解侵蚀速率的数十倍(唐伟等, 2014; 刘再华等, 2006)，因此，将具有侵蚀力的外源水引入流经岩溶区，或作为灌溉用水，是人为干预、固碳增汇的技术途径之三。

(4) 水生植物的选择和培育，提高岩溶碳汇的稳

定性。不同的水生植物品种，尤其沉水植物，为了适应水体中易利用游离 CO_2 的有限性，近一半的沉水植物演化出可以直接将 HCO_3^- 作为光合碳源的生理特性，不同的植物品种利用 HCO_3^- 的效率存在差异，因此，选择和培育沉水植物品种、营造与AAPB融合的人工水生生态环境，将大量的岩溶水体中的无机碳转化为较为稳定的RDOC，提高岩溶碳汇的稳定性，是人为干预、固碳增汇的技术途径之四。

据初步估算的结果显示，全球每年因碳酸盐岩溶解风化产生的碳汇通量为0.36~0.44 PgC/a，约占森林碳汇的32.73%~40.00%，土壤碳汇的45.00%~55.00%，中国岩溶碳汇通量相当于森林碳汇的56.00%，土壤碳汇通量的60%(Cao et al., 2016; Cao et al., 2012)。

岩溶作用产生的碳汇效应在全球碳循环中的作用越来越得到国际学术界的认可，2011年Science期刊刊登了岩溶碳汇的全球意义(Larson, 2011)，同时，在最新的IPCC-AR5报告中，将碳酸盐岩风化溶解的碳汇效应的时间尺度视为 10^3 ~ 10^4 年，与硅酸盐岩风化的碳汇时间尺度(10^4 ~ 10^6 年)区分；且将碳酸盐岩溶解风化的产生碳汇技术纳入去除大气 CO_2 的4个技术方法之一(陆地生态过程、海洋碳汇、人工直接捕捉和岩溶碳汇)，时间尺度定位 10^2 ~ 10^3 年(蒲俊兵等, 2015)。

5 岩溶动力系统与水循环研究新进展

5.1 不均一的岩溶含水介质结构和探测技术不断发展

5.1.1 地表、地下河流分布特征揭示岩溶水文地质结构双层性

贵州省碳酸盐岩分布面积12.96万 km^2 ，枯季流量 >20 L/s的地下河1130条，其中806条分布在纯石灰岩分布区。岩溶地下水多年平均天然补给量 $316.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，占全省地下水的72%；允许开采量 $127.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，占全省地下水的91.90%(王明章, 2006)。以GIS为技术平台，在1:5万地表水系图上，叠加岩性图，计算了不同岩性区地表河网密度，结果显示：非碳酸盐岩地区河网密度($1000.43 \text{ m}/\text{km}^2$)要远远高于碳酸盐岩地区；白云岩地区河网密度($779.41 \text{ m}/\text{km}^2$)高于石灰岩地区($597.16 \text{ m}/\text{km}^2$)(陈伟燕等, 2013)(表2)。广西岩溶区地表河总长度约2.3

万 km, 密度为 0.23 km/km², 而非岩溶区总长度达 4.7 万 km, 密度为 0.35 km/km²; 1:20 万水文地质调查结果, 广西长度大于 2 km, 并独立存在的地下河有 435 条, 总长度超过 1 万 km, 密度 0.1 km/km²(莫日生等, 2006)(图 14)。

5.1.2 示踪技术的发展, 为定量认识岩溶地下管道提供技术

利用岩溶地下水系统野外试验场的优势, 开展天然、人为示踪剂, 不仅揭示地下水的连通性, 同时, 根据示踪过程、结果与不断挖掘其在揭示岩溶地下管道特征方面的应用(易连兴等, 2010; 何师意等, 2009)。如桂林寨底岩溶地下河系统中, 荧光素钠示踪剂的应

用, 揭示响水岩—寨底地下河出口间的管道, 在枯季, 水流平均滞留时间 14.5 d, 平均流速 206.9 m/d, 过水管道体积 1.25×10⁵ m³, 过水断面面积 41.72 m², 等效直径 7.29 m(陈余道等, 2013)。

5.1.3 综合应用地球物理探测技术不断发展

在贵州省安顺市普定县陈旗流域, 利用山体开挖剖面 and 探地雷达, 对岩溶表层带的结构进行观测研究, 其结果显示: 在观测区域, 表层岩溶带发育厚度由山下的 3.5 m, 逐渐向山上递减到 2.3 m; 溶蚀裂隙随深度增加显著减小, 从表层 6.1% 减少至 5 m 深处 0.9%, 1~1.5 m 范围内裂隙率最高, 为 7.6%, 3 m 内裂隙发育较好(平均裂隙率 6.2%)(张志才等,

表 2 贵州省地表河网与岩性的统计(陈伟燕等, 2013)

Table 2 Relationship between the surface river network density and lithology rivers developed in Guizhou (after Chen et al., 2013)

岩石类型	河网长度/km	区域面积/km ²	河网密度/(m/km ²)
连续性石灰岩组合	13502.16	30676.34	440.15
石灰岩夹碎屑岩组合	14631.95	19339.41	756.59
石灰岩与碎屑岩互层	16799.96	25230.51	665.86
连续性白云岩组合	17627.62	22990.48	766.74
白云岩夹碎屑岩组合	5886.58	7209.95	816.45
白云岩与碎屑岩互层	238.27	275.85	863.77
石灰岩、白云岩混合组合	2281.12	3689.78	618.23
硅质岩、变质岩等	6671.02	66681.61	1000.43

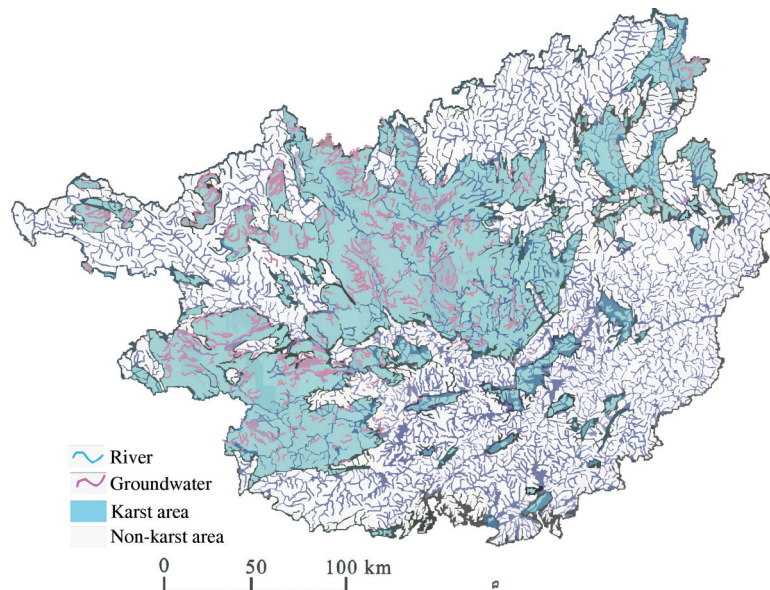


图 14 广西岩溶区与非岩溶区地表、地下河分布

Fig.14 Comparison of the distribution of surface river and underground river in karst and non-karst, Guangxi

2011)。

近年来,在针对岩溶地下管道、地下河探测地球物理技术进行了大量探索,取得一系列的经验总结(甘伏平等,2010;黎华清等,2008;甘伏平等;2006):

地下水流通道埋深小于 50 m,采用高密度电法,且维纳装置,具有高纵向分辨率,偶极装置,较高横向分辨率;地下水流通道埋深大于 50 m,采用浅层地震反射法,特别适宜探测由构造控制发育的地下暗河,对确定诸如断层的宽度、倾向等要素,效果较好;但该方法不适合岩溶区基岩裸露的地区。

精细地反映地下水流管道的空间分布特征,采用跨孔电磁波透视(图 15),该方法较少受探测深度、地形起伏的限制,获取的图像较直观、分辨率高,特别在岩溶区地基探测、水库渗漏、帷幕灌浆等方面得到广泛的应用。

5.1.4 岩溶地下河发育、分布取得新认识

随着岩溶水文地质调查,岩溶地下河的发育规律、空间分布规律不断取得新认识。根据最新的岩溶地下水类型的划分,西南岩溶区地下河系统 1179 个、岩溶泉系统 1152 个、集中排泄带系统 562 个和分散排泄系统 727 个(表 3),尤以黔、桂、滇东最为发育(裴建国等,2008;韩行瑞,2015;杨立铮,1985)。

(1)云贵高原向广西盆地过渡的地貌斜坡地带,包括滇东南、黔东南、桂西部分地区、碳酸盐岩大面

积出露,褶皱平缓,地形切割强烈,地下河表现为:

流程长,汇水面积大。主流长达数十千米,汇水面积达数百平方千米者几乎全都分布在这些地区,如著名的广西地苏地下河长达 45 km,汇水面积近 1000 km²,贵州罗甸大小井地下河长有 65 km。

地下河的埋深大,地下水垂直循环带厚,一般都在数十米至 100 m 以上。水力坡度陡,大者可达 20%。

结构形态复杂,树枝型地下河分布普遍,主流、支流清晰,管道明显,规模壮观。

集中排泄量大,地下河岩溶水资源丰富,常为地表河的源头。

(2)长江和珠江分水岭地带,包括贵州中部都匀到贵阳至安顺一带,短轴背、向斜发育,地形切割不强烈,地势较平坦,地下河的发育表现为:

径流短,规模不大,主流长度一般数千米,少数超过 10 km,汇水面积一般为数十平方千米。地下河流量小,枯季流量大多为每秒几百升。

埋藏浅,水力坡度小,地下水垂直循环带厚度薄,一般小于 20 m,埋藏浅者只有数米。仅在大河谷坡地带埋深可超过百米。

地下河与地表河交替出现。形态多样,袭夺频繁。

(3)川黔线状褶皱带,包括川东南、黔北、滇东北、鄂西和湘西部分地区,北东向华夏系构造发育,可溶岩与非可溶岩相间呈带状分布,地形上为条形谷地,地下河基本上沿构造线延伸,以单管型地下河为主,长度短小,一般在数千米范围。

(4)广西岩溶峰林平原,地下河埋藏浅,分支多,水力坡度平缓,出现虹吸承压管道,地下河发育深度不受当地侵蚀基准面控制。

根据不完全统计,广西 445 条地下河,地下河出口位于纯灰岩的占总数的 80%,出露密度为 5.33 个/1000 km²,枯季流量占总枯季流量的 82.6%;地下河出口分布在白云岩地区的最低,占 0.67%,密度为 1.95 个/1000 km²(覃小群等,2007)。

5.1.5 岩溶水文数学模型的探索

由于岩溶含水介质的不均一性、水文地质结构的复杂性,已经成熟的非岩溶区的水文模型很难在岩溶区得到应用,岩溶工作者在此方面也做出了不懈的努力。

如袁道先等(1996)在水箱模型的基础上开发出

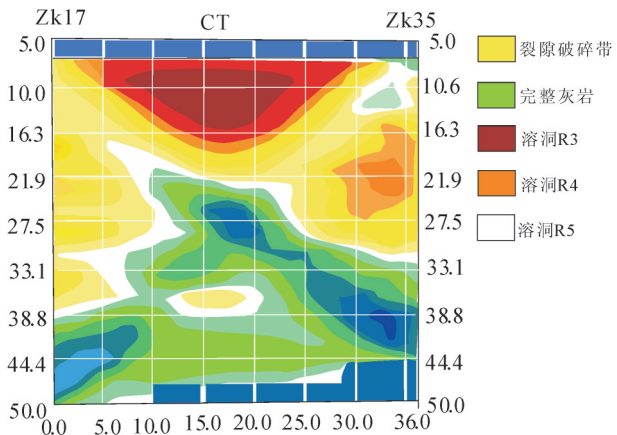


图 15 广西靖西大龙潭水库防渗漏跨孔电磁波透视图 (黎华清等,2008)

Fig.15 Perspective image with the electro-magnetic wave between the drill holes for the seepage of Dalongtang reservoir, Jingxi, Guangxi (after Li et al., 2008)

表3 西南岩溶地下水系统划分及统计分布(裴建国等,2008)

Table 3 Classification and amounts of the karst underground rivers in Southwest China (after Pei et al., 2008)

地区	地下河系统	岩溶泉系统	集中排泄带系统	分散排泄带系统	合计	备注
贵州	219	109	218		576	
广西	347	208		332	887	
云南	96	285	163	203	747	滇东
四川	94	226	2	87	409	川南、攀西
重庆	85	44			129	渝东南
湖南	206	51	137		394	湘西、湘南
湖北	48	145			193	鄂西
广东	84	84	12	105	285	粤北
合计	1179	1152	562	727	3620	

注:单位为个。

的桂林“丫吉模型”,这是最早在西南岩溶地区成功建立的流域水文模型之一。由于对水文过程、输入变量以及产流空间分布的不明确使得该模型从严格意义上说仍属于黑箱模型。

陈宏峰等(2005)利用BP人工神经网络建立了湖南洛塔河地区表层岩溶泉的径流预测模型等;基于线性矩法和MK等方法分析了贵州岩溶流域径流过程的年度和季节变化、洪枯水变化规律及其演变的空间特征(Shi et al.,2010)。由于此类方法缺乏必要的物理基础,用于预测则存在较大的不确定性,因此在岩溶水文循环研究中很难有进一步发展的空间。

近年来,为适应岩溶地区多重含水介质特征,引入能模拟岩溶管道紊流和无压流的CFP(Conduit Flow Process)模块,针对岩溶含水介质特征分3种运行模式:CFPM1使用离散的管道代表岩溶管道流,着重刻画岩溶洞穴、大型地下管道特征;CFPM2加入强透水能力的水流层,着重描述岩溶含水层快速的水平优先流;CFPM3将离散管道和紊流层结合,使用雷诺数区分层流、紊流,适用于复杂的多重岩溶含水介质(杨杨等,2014;Xu et al.,2014)。

5.2 岩溶动力系统中水循环过程及开发利用模式进展显著

岩溶动力系统的水循环包括大气降水、地表径流、壤中径流、岩溶表层带径流、地下径流的“五水”转化(曹建华等,2004;Bonacci et al.,2009)(图16),重点是各界面水文过程的监测和水文参数的获取。

5.2.1 降水与植物蒸腾

植物蒸腾是植物吸水、水分和矿物质迁移、降

低植物体温度、行光合作用的动力,正常情形下,植被吸收的90%~95%的水分都因蒸腾作用而散失到大气中。因此,植物蒸腾是影响降水再分配的重要因素,岩溶区地表水资源短缺、地下水资源丰富,植物易利用水源少,经常面临干旱胁迫。为了适应水分供应不足的岩溶生境,岩溶植被在长期的演化过程中形成各种各样的适应性。如与品质植物相比,岩溶区的植物缩小其叶面积、加厚角质层、气孔凹

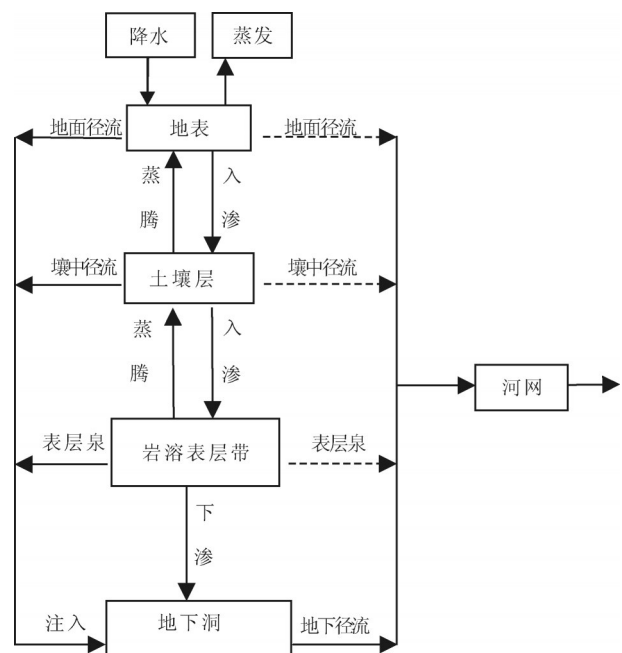


图16 岩溶区水循环过程中的“五水”转化关系(曹建华等,2005)

Fig.16 “Five water” type and transfer of water cycle in karst area(after Cao et al., 2005)

陷且数目较少(图 17)、提高水分利用效率(邓艳等, 2004; 欧祖兰等, 2004)。桂林毛村同一品种的灌木—櫟木, 生长在岩溶区时, 其叶片气孔数目较少、尺寸较小(李小方等, 2008)。植物降低气孔开度、甚至关闭气孔, 减少蒸腾量, 但也减少大气 CO_2 , 通过气孔向植物叶片的输入, 为了不影响光合作用, 一些植物演化出直接利用岩溶地下水无机碳, 作为碳源, 行光合作用(吴沿友等, 2011a; 吴沿友等, 2011b)。

与深根系植物通过利用岩石裂隙水或深层水分来抗旱不同, 浅根系植物一般通过提高水分利用效率来适应干旱胁迫, Nie 等(2011)研究发现, 连片基岩出露生境落叶乔木菜豆树 (*Radermachera sinica*) 的水分来源存在季节变化, 旱季主要利用表层岩溶带水, 雨季则以近期雨水为主(0~30 cm 浅层土壤水为主)。

针对水分间歇式亏缺的相对湿润地区植被群落存在深根系植物提水作用, 以供表层浅根系植物水分的补给, 维持植物群落的生存(Dawson, 1993)。

植物蒸腾的一个重要功能是降低植物体温度、驱动养分运移, 蒸腾作用减弱, 影响植物新陈代谢, 在水分状况变好的状况下, 势必会“补偿性”的提高蒸腾, 恢复、修复正常功能发挥的机体。

植物在适应岩溶区季节行水分短缺的同时, 势必也会影响对降水的再分配, 有限的数据显示, 既有植被覆盖的增加, 提高降水量(康志强, 2012); 也有植被覆盖率高, 降低径流系数(王世杰等, 2017)。

5.2.2 地面径流与壤中径流

土壤是对降水具有很重要的调蓄能力的地质—生态介质, 是支撑着生态和农业需水的重要环节(易淑荣等, 1993)。在土壤水分中, 能被植物吸收利用的水称为有效水, 是指土壤田间持水量(土壤水势为 -0.21 MPa)与凋萎点土壤含水量(土壤水势为 -1.5 MPa)之间的差值; 土壤速效水是指易被植物吸收利用的水分, 它是田间持水量与毛管水断裂量(土壤表面水分蒸发明显降低)之间的差值; 土壤迟效水是指毛管水断裂量与凋萎点土壤含水量的差值; 而凋萎点以下的土壤水分为无效水。

当大气降水或灌溉强度超过土壤吸持水分的能力时, 多余的水就由于重力的作用向下流失, 这种形态的水称为重力水, 有时因为土壤黏紧, 重力水一时不易排出, 暂时滞留在土壤的大孔隙中, 就称为上层滞水。

而针对岩溶石山区, 山体的上部碳酸盐岩裸露率很高、土壤覆盖率很低、呈零星分布; 在山体的中部到下部, 土壤覆盖由薄到相对较厚, 由零散逐渐到连片; 在洼地中, 土壤层相对较厚。鉴于岩溶石山区, 碳酸盐岩风化成土速率先天不足, 低洼集土区域所占面积很小, 土壤对水分的调蓄能力很低, 壤中径流对区域水循环的影响就相对较弱。大部分降水以土壤重力水的形式, 入渗溶蚀孔隙发育的岩溶表层带。

岩溶石山区坡面产流主要来源于: 大气—岩石

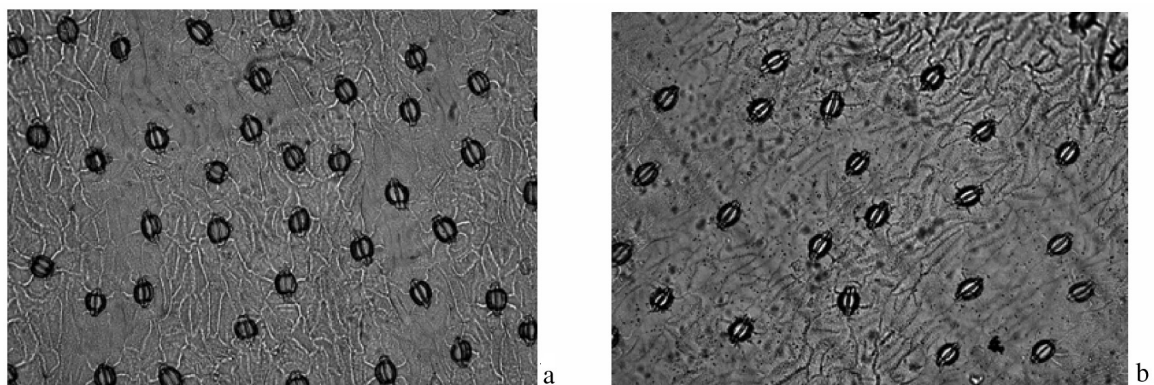


图 17 桂林毛村生长在岩溶区、非岩溶区櫟木下表皮气孔分布特征(李小方等, 2008)

a—非岩溶区; b—岩溶区; 照片为目镜倍数×物镜倍数=4×100

Fig. 17 Comparison of stoma density, size of and Loropetalum Chinese between the karst and non-karst in Maocun Karst Experimental Site, Guilin(after Li et al., 2008)

a-Non-karst; b-Karst; the images under microscope with the eye lens×objective lens=4×100

界面的超渗产流;大气-土壤界面的超饱和产流;土壤-岩石界面的壤中流(姜光辉等,2009);主要包括2个阶段补偿阶段、饱和径流阶段,补偿阶段在降雨强度大于入渗强度时可产生坡面流,饱和径流阶段坡面流流量与降雨强度成正比(常勇等,2010)。广西环江,基于大型径流小区5年(2006—2010年)的观测资料,揭示了岩溶石山坡面次降雨径流系数 < 5% (0.01%~4.57%)(陈洪松等,2012)。贵州岩溶地区普定县,观测资料(2007年7月至2008年2月)揭示地表径流量为0.99~10.8 mm(相应的穿透雨量为464~541 mm),次降雨地表径流系数为0.01%~12.81%(彭韬等,2008)。

5.2.3 岩溶表层带径流

表层岩溶带的发育程度、发育深度与岩性、构造、气候、水文和土壤-植被条件关系密切(覃小群等,2005)。产状平缓的岩层比产状陡的岩层表层岩溶带发育程度高、厚度较大,断裂构造附近及构造应力集中的部位表层岩溶带的发育程度较高(劳文科等,2002);在南亚热带湿热多雨的广西桂林,表层岩溶带的厚度可达10 m以上,在中亚热带的贵州高原,表层岩溶带的厚度一般在2 m左右,在北亚热带与温带交界的秦岭山区,岩溶表层带已不明显(蒋忠诚,1998)。桂林丫吉岩溶水文试验场的研究结果表明:当场雨降雨量 < 5 mm 时,表层带的调蓄量为泉域总调蓄量的98.58%。当场雨降雨量为5~10 mm、10~30 mm 和 30 mm 以上时,其调蓄量分别占泉域总调蓄量的73.91%、77.29%和67.69%(袁道先等,

1996);而位于丫吉岩溶水文试验场包气带洞穴滴水监测的结果显示:雨季滴水对降雨响应迅速,XY5滴水对降雨响应的滞后时间为10 h;而旱季对降雨的响应滞后明显,滞后时间达9.8 d,体现了土壤和表层岩溶带的调蓄作用,74.4 mm 降雨量是旱季转雨季滴水响应的降雨阈值(郭小娇等,2017)(图18)。

在岩溶山区,如果表层岩溶带中存在隔水层,表层岩溶带能够形成大面积的连续含水层,并发育流量较大、动态比较稳定的岩溶泉水。

根据不同地区表层岩溶带环境条件的差异和同类地区的环境条件的相似性,利用GIS技术方法,对西南表层岩溶水资源进行了初步评价,研究表明,西南岩溶石山地区具备表层带岩溶调蓄能力的面积在24.5万 km²左右,表层带岩溶含水层所具备的调蓄能力总量为247.4 亿 m³/a,相当于降水补给量的8.06%(陈植华等,2003)。

5.2.4 岩溶地下径流、调蓄与开采模式

劳文科等对位于湘南-桂北岩溶丘陵区石期河岩溶水流域进行了调查,对水动态过程进行监测,分析了水流量衰减过程和系统对水流量调蓄能量,结果显示,流域坡面产流、赋存于大型溶洞或管道中的溶洞-管道水、赋存于小型管道或强岩溶化裂隙中的管道-裂隙水及赋存于细小溶蚀裂隙中的溶隙水,4种不同性质的岩溶水所占岩溶水资源总量的3.64%、4.53%、74.10%和17.73%,即小型管道或强岩溶化裂隙是岩溶地下水赋存的主要部位(劳文科等,2009)。

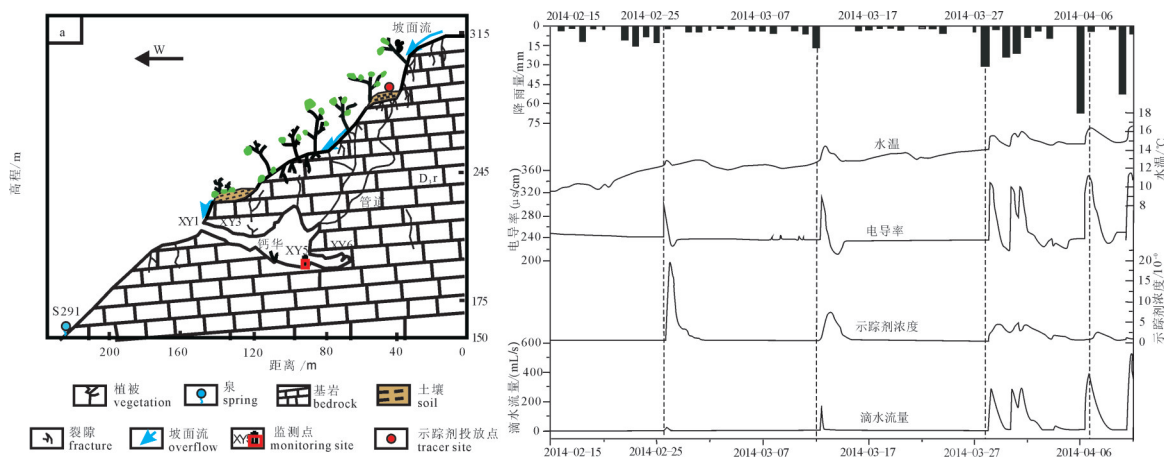


图18 桂林丫吉岩溶水文试验场硝盐洞滴水点分布及水文、水化学及示踪结果(郭小娇等,2017)

Fig.18 Geological section showing monitoring points in Xiaoyan Cave and hillslope, and the results of the hydrological, water chemistry and tracer tests (after Guo et al., 2017)

调查表明,中国南方云南、贵州、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东8省(市、自治区)岩溶地下水资源开发利用潜力为534亿 m^3/a ,现状开采量66亿 m^3/a ,开发利用潜力巨大(图19)。针对中国南方岩溶区不同地貌类型、水文地质条件背景,提出了堵洞成库、建柜蓄水、抽水调节和束流壅水4种岩溶地下水有效开发利用模式(Xia, 2016; Cao et al., 2016; 夏日元等, 2017)(图20)。

6 岩溶动力系统与钙循环新进展

6.1 富钙的岩溶动力系统

碳酸盐岩的富钙性,是岩溶动力系统富钙性的源头。钙是岩溶动力系统中最具特色的元素,它是土壤中的盐基离子、植物必需的大量营养元素,制约着岩溶生态环境特征。是目前国家岩溶石漠化综合治理中,若干生态机制需要深入揭示的科学问题。

(1)大气降水的富钙性。由于雨点总是围绕着尘粒,而岩溶生态系统中的大气尘粒常是钙质的,以致雨水中含有较高的钙,如广西、贵州岩溶地区的雨水中的钙含量达2.9~6 mg/L,非岩溶地区雨水

中钙离子含量常低于1 mg/L(蒋有绪等, 1991; 卢玫桂等, 2006)。

(2)岩溶水的富钙性。与砂页岩中的裂隙水相比,发育于石灰岩、白云岩区的表层泉水和地下水水体中的钙离子含量,要高出近1个数量级(曹建华等, 2004)。

(3)土壤的富钙性。桂林市毛村地下河流域中生长在岩溶区石灰土上同种植物根际土的钙的含量介于0.653%~1.312%,比生长在红壤上(<0.34%)高出2.6倍(曹建华等, 2011)。

(4)植被的富钙性。亚热带茂兰森林岩溶区,植物灰分含量平均为8.71%~9.77%,CaO含量达到2.41%~2.52%,是区外非岩溶区的1.63、1.61倍;植物的灰分组成达7.47%,CaO含量为2.88%,是海南尖峰岭花岗岩区的1.27、3.36倍(蒋有绪等, 1991; 曹建华等, 2003)。

6.2 钙在岩溶动力系统赋存形态及影响

6.2.1 岩溶区石灰土中的钙主要以离子交换态为主,易迁移的钙含量占80%以上

在桂林毛村岩溶地下河流域,采集典型石灰土

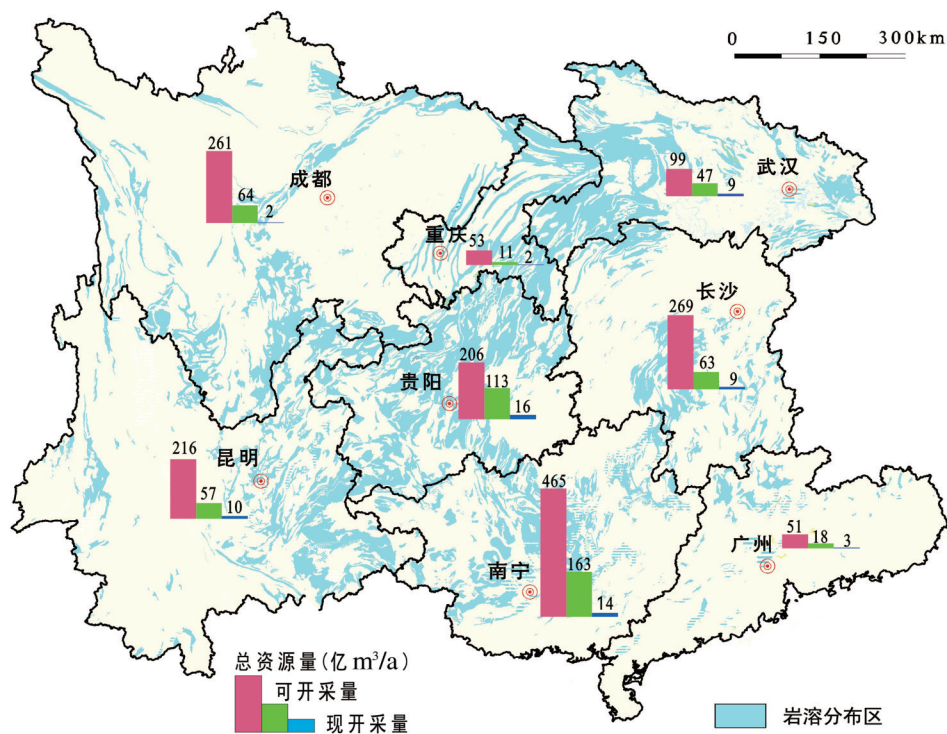


图19 西南岩溶区地下水资源量、可开采量和现开采量的对比(夏日元等, 2017)

Fig.19 Total, allowable exploitation and already exploitation amount of karst underground water resources, Southwest China(after Xia et al., 2017)

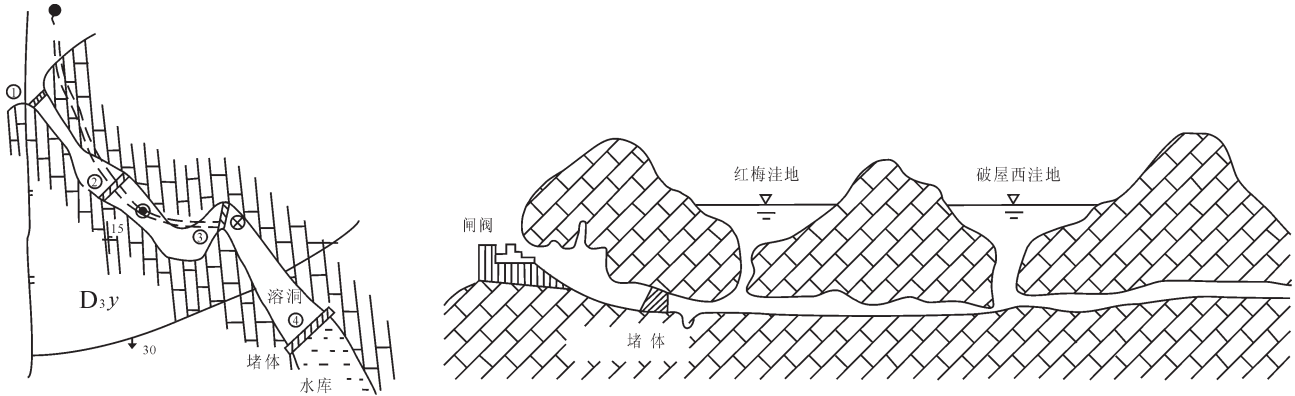


图20 贵州省奋发地下河堵坝形成地表、地下联合水库示意图(王明章等,2006)

Fig. 20 Sketch diagram of the reservoir united surface and underground dammed the Fengfa underground river in Guizhou(after Wang et al., 2006)

和红壤,采用改进的 Tessier 提取法分析土壤钙赋存的形态,结果显示:石灰土中钙含量 0.7%~0.9%,离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态、强有机结合态(包括部分硫化物态)、腐殖酸结合态+残渣态+铁锰氧化物结合态+含量分别占总全量 87.1%、8.47%、2.26%、2.17%;红壤中钙含量 0.003%~0.04%,与石灰土相差 1~2 个数量级。铁锰氧化物结合态、离子交换态(包括水溶态)、腐殖酸结合态、强有机结合态(包括部分硫化物态)、碳酸盐结合态和残渣态分别占总量的 30.37%、27.33%、14.01%、12.39%、12.02%和 3.88%。

钙是土壤中的盐基离子,影响着盐基饱和度,盐基饱和度的大小制约着土壤的酸碱度,因此,岩溶区石灰土钙含量与土壤 pH 值含量存在线性关系(图 21)。

6.2.2 岩溶区嗜钙型植物叶片中钙以果胶酸钙形态为主,且主要赋存在细胞壁

在贵州茂兰国家级自然保护区岩溶区(石灰岩、白云岩)板寨地下河流域、非岩溶区(砂岩、页岩区)尧排流域,采集岩溶区、非岩溶区植物品种各 13 种,其中岩溶区、非岩溶区特有植物品种各 6 种,分析其叶片中钙质总量、形态及分布部位(亚细胞组分),结果显示(曹建华等,2011):

岩溶区植物叶片钙质含量平均为 1216.82 mg/kg,比非岩溶区高出 58.45%。

岩溶区嗜钙型植物叶片中钙以果胶酸钙形态为主,其含量占总钙质量的 27.91%~32.82%;而非岩溶区嫌钙型植物叶片中的钙质以草酸钙形态为主,占总钙质量的 33.69%~34.34%。

岩溶区嗜钙型植物叶片中的钙主要赋存在细胞壁中,占总钙质的 59.05%~66.54%,而非岩溶区嫌钙型植物叶片中的钙主要赋存在胞质中,占总钙质的 36.67%~43.77%。

6.2.3 富钙的土壤环境制约其他金属离子在土壤中的赋存状态

以广西桂林毛村岩溶生态试验场石灰土、红壤为研究对象,通过 Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、B、Co、P 等 10 种元素的对比分析,揭示富钙、偏碱的岩溶地球化学环境对土壤中营养元素丰度的影响:(1)石灰土中营养元素的全量,除 B 素外,其他元素均大于红壤的。其中 Ca、Mg、Zn 石灰土的含量是红壤的 3.68、4.64、3.96 倍;Mn、Cu、Co、Fe 则分别是红

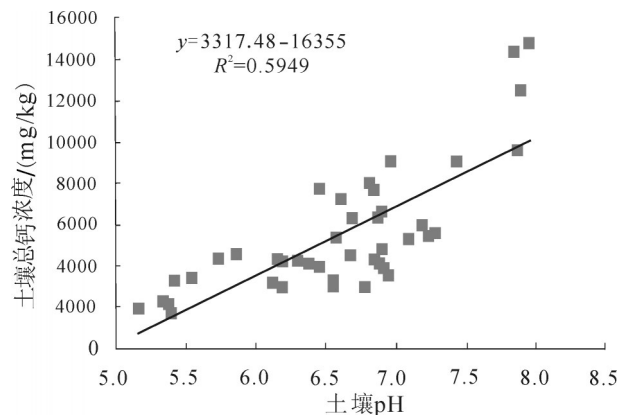


图21 桂林丫吉岩溶区土壤总钙与pH线性关系

Fig. 21 Relationship between soil pH and soil total calcium content in Yaji Karst Experimental Site, Guilin

壤的1.68、1.64、1.39和1.25倍;P、Mo石灰土的含量略高于红壤的;而B石灰土的低于红壤的。(2)石灰土中营养元素有效态含量,除了Ca、Mg、Cu素的有效态含量高于红壤的,其他营养元素有效态含量均小于红壤的,其中Mn、Zn有效态含量仅为红壤的60%;Fe、P、Mo的有效态含量仅为红壤的30%~40%;B的有效态含量仅为红壤的10%(图22)。

6.3 钙在岩溶动力系统中的迁移亟待加强

由于岩溶生态系统中的钙库巨大,影响着岩溶生态系统的一系列特征。钙活跃的迁移性,又影响着岩溶动力系统的运行和生态环境健康(姬飞腾等,2009)。美国南部亚特兰大(Atlanta)州Panola山区森林生态系统的钙循环进行了观测研究,其结果显示通过薪炭林输出、土壤淋溶输出和大气沉降输入的通量分别为12.3 kg/ha.a、2.71 kg/ha.a、2.24 kg/ha.a,土壤钙每年的损耗量12.76 kg/ha.a,以此速度80年后,森林生态的钙营养将失衡,威胁着生态系统生产力的可持续性和健康(Huntington et al., 2000)。Lawrence et al.(1995)在美国的东北部森林生态系统中也观测到同样的结果。Jandl et al.(2004)也报道了欧洲中部森林生态系统中土壤可交换性钙库量处于持续降低状态。

虽然我们已经积累了相关的技术方法,如钙同位素测定为深入揭示岩溶动力系统中的钙迁移提供了可能(Bullen et al., 2004; Gussone et al., 2003),但对岩溶动力系统中钙迁移数据的积累还很少、对迁移规律的认识还显肤浅。

7 岩溶动力系统与全球环境变化研究发展展望

地球关键带是美国国家研究委员会提出21世纪最重要的地球科学基础研究方向(National Research Council, 2001; National Research Council, . 2012),是对地球系统科学的深入,随着近年的研究进展,提出地球关键带调查研究的重点是“界面过程”和“尺度转化”,以及“3M(填图-Mapping、监测-Monitoring、建模-Modelling)”调查研究技术途径,填图是了解关键带组成与结构的基础;监测是了解关键带随时间变化;建模是开展关键带过程机理、评价和预判(杨建锋等,2014)。碳酸盐岩的可溶性,丰富、成层的地下空间(洞穴、地下河),使岩溶成为深入研究地球关键带、可望取得突破成果的重要地质体。

同时,近年来,随着大力发展绿色清洁能源的需求,地热调查研究不断深入,碳酸盐岩的易溶性,孔隙、溶隙的形成,具有良好覆盖层埋藏型深部碳酸盐岩地层成为重要的“地热库”(王树芳等,2014; 马腾等,2012; 王宇等,2016),有资料显示,深部岩溶水中的CO₂分压,随着深部的增加而增加(任美镠, 1982),这就需要对高温、高压、高CO₂分压的情况下,碳酸盐岩溶解,消耗CO₂的深入研究,以及对“地热库”形成演化的影响,与此同时,还需揭示热的深部岩溶水出露地表后,对近地表岩溶关键带碳循环影响的机制和程度。

2016年11月14日,“全球岩溶动力系统资源环

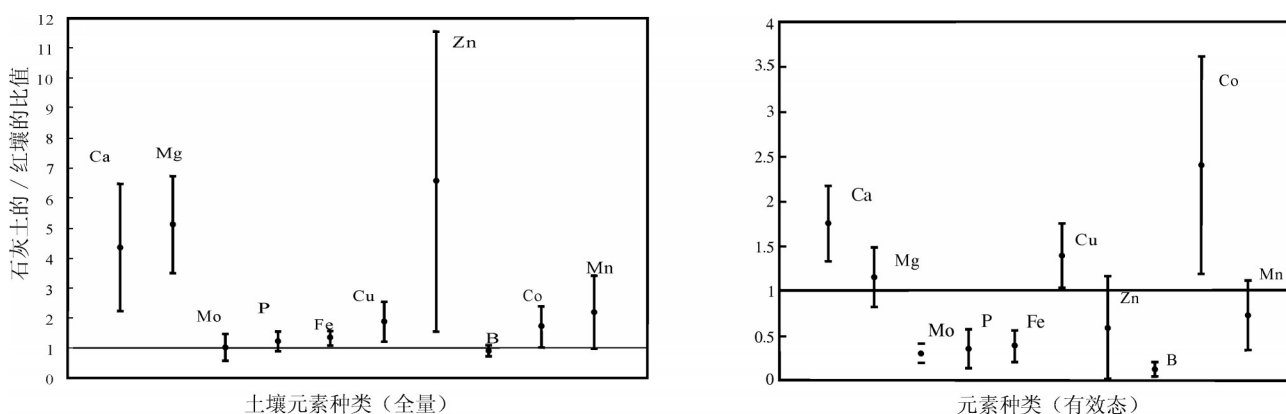


图22 桂林毛村石灰土和红壤土壤营养元素总量、有效态平均比值(95%置信度)

Fig. 22 Comparison of total and liable concentration of some soil nutrient elements between the limestone soil and red soil in Maocun Karst Experimental Site, Guilin (with the 95% confidence coefficient)

境效应”国际大科学计划在国土资源部中国地质调查局主持下,于桂林启动。该计划以地球关键带的理论和方法,完善岩溶动力系统理论,创新岩溶关键带研究,以岩-水-生-气相互作用为基础,调查研究岩溶关键带结构,引进和完善岩溶关键带3M技术方法,揭示岩溶关键带的地质过程、生物地球化学过程、水文过程和生态过程,及各界面物质迁移转化,重点开展6个领域的工作:研发流域尺度岩溶碳循环及固碳增汇;岩溶地下水-地表水耦合的可持续管理模型;岩溶生态系统脆弱性与服务功能评价;利用岩溶洞穴石笋架构过去气候与现代气候变化的桥梁;岩溶塌陷发生机制及预警;岩溶形态演化与景观资源保护;碳酸盐岩与矿产资源。

以需求导向、问题导向和目标导向为原则,破解岩溶区资源问题,包括水资源、土壤资源、生物资源、岩溶景观资源;解决环境问题,如应对全球气候变化,石漠化综合治理,岩溶塌陷防治等。

实施“岩溶动力系统的资源环境效应”国际大科学计划,旨在通过多种形式的国际合作,共绘全球岩溶一张图,建立全球岩溶信息平台,深化全球岩溶动力系统科学技术研究,突破岩溶关键带资源环境科学问题的瓶颈,为人类提供全球岩溶公共服务信息,为不同类型岩溶地区资源可持续利用和应对全球环境变化提供科学依据。

8 结 论

(1) 碳酸盐岩是地球最大的碳库。碳酸盐岩是岩溶发育的物质基础,它记录着地球历史时期的环境变化,是地球最大的碳库,储存着全球99.55%的碳量,在地球大气和地球生命演化过程中起到重要作用。

(2) 岩溶动力系统是地球表层系统的重要组成部分。现代碳酸盐岩分布面积约占陆地面积的15%,地质、生态过程是岩溶作用的驱动力,且对气候环境变化响应敏感;近30年以来,成功地连续6次获得联合国教科文组织与岩溶相关的国际地质计划,提出具有地球系统科学指导、全球视野的岩溶动力学理论,对认识和解决岩溶区资源环境问题发挥重要的指导意义。

(3) 岩溶动力系统是富碳的系统。碳酸盐岩溶解消耗大气/土壤中CO₂、并转移到水体中,产生碳汇效应,经过不懈追踪岩溶碳循环过程和碳形态的

转移,提出流域尺度岩溶碳循环及碳汇效应研究新方法,估算的岩溶碳通量与森林碳汇、土壤碳汇通量处于同一数量级。

(4) 岩溶含水介质据不均一性,以地下水资源为主。中国西南碳酸盐岩广泛分布的岩溶区、对岩溶地下水资源的迫切需求和对水害的防治,长期的岩溶水文地质调查研究,不断深入的揭示岩溶含水介质发育的特征及地下水赋存状态,不断不同岩溶水文地质单元地下水资源开发利用模式积累。

(5) 岩溶动力系统是富钙的系统。碳酸盐岩的富钙性是岩溶动力系统富钙的根本来源,富钙性导致土壤、植物、水体的富钙和偏碱性,制约着水分和养分的循环,影响着植物物种的选择和石漠化的综合治理和生态系统健康。

(6) 岩溶关键带的调查研究是破解岩溶区资源环境瓶颈问题的技术途径。“全球岩溶动力系统与资源环境效应”国际大科学计划的启动,可望在中国岩溶区取得地球关键带调查研究方法体系和成果的突破,破解岩溶动力系统资源环境问题的瓶颈。

致谢:感谢审稿专家及编辑部老师所提出的宝贵意见。

References

- Bonacci O, Pipan T, Culver D C. 2009. A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology*[J],56(5): 891-900.
- Bullen T D, Fitzpatrick J A, White A F, Schulz M S, Vivit D V. 2004. Calcium stable isotope evidence for three soil calcium pools at a granitoid chronosequence. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Water-Rock Interaction*(editors: Bullen T D, Fitzpatrick J A, White A F)[M]. Saratoga Springs, New York, 1: 813-817.
- Cao Jianhua, Hu B, Groves C, Huang Fen, Yang Hui, Zhang Chunlai. 2016. Karst dynamic system and the carbon cycle[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 60(2):35-55.
- Cao Jianhua, Jiang Yuchi, Milanovic P. 2016. Hydrogeological settings for underground dams construction—four case studies from Southwest karst area of China, In: *Karst Without Boundaries* (editors: Stevanovic Z, Kresic N, Kukuric N)[M]. Taylor & Francis Group, London, UK: 311-320.
- Cao Jianhua, Wang Fuxing, Huang Junfa, Huang Jifu, Wang Jin. 1993. The erosion action of biokarst on limestone in Guilin area[J]. *Carsologica Sinica*, 12(1):11-22(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Wang Fuxing. 1998. Reform of carbonate rock subsurface by crustose lichens and its environmental

- significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(1):94–99.
- Cao Jianhua, Yang Hui, Kang Zhiqiang. 2011. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(26): 2181–2187(in Chinese).
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian. 1999. Relationship between water–holding of carbonate rock and saxicolous algae, lichen and moss and its ecological significance[J]. *Geochimica*, 28(3):243–256(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Groves C, Huang Fen, Yang Hui, Lu Qian. 2012. Carbon fluxes and sinks: the consumption of atmospheric and soil CO₂ by carbonate rock dissolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 963–972.
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Pan Genxing. 2001. Preliminary study on biological action in karst dynamic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(1):203–209(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Pan Genxing. 2003. Some soil features in karst ecosystem. *Advance in Earth Science*, 18(1):37–44(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Yuan Daxian, Pan Genxing, Jiang Guanghui. 2004. Influence of soil carbon transfer under different vegetation on carbon cycle of karst dynamics system[J]. *Earth and Environment*, 32(1): 90–96(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Zhang Cheng, Jiang Zhongcheng. 2004. Karst ecosystem constrained by eological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, (1): 1– 8 (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Zhou Li, Yang Hui, Lu Qian, Kang Zhiqiang. 2011. Comparison of carbon transfer between forest soils in karst and clasolite areas and the karst carbon sink effect in Maocun village of Guilin[J]. *Quaternary Sciences*, 31(3): 431– 437(in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Zhu Mingjie, Huang Fen, Lu Qian. 2011. Comparison study on calcium forms in plant leaves under different geological background—a case study in Maolan, Guizhou Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(3): 251– 260 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yong, Jiang Guanghui, Kang Caixia, Yu Shi. 2010. Run–off process of over land flow in peak cluster depression: the case from Guilin Yajie Karst Experiment Site[J]. *Journal of China Hydrology*, (6): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongfeng, Zhang Fawang, He Yuan, Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Su Chuntian, Luo Shuwen. 2016. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for karst systems[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (43)5:42–46(in Chinese with English abstract).
- Cheng Hongfeng, Zhu Mingqiu, Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Liang Bin. 2005. Analysis on epikarst spring with BP ANN(artificial neural network) in Luota, Hunan province[J]. *Carsologica Sinica*, (4): 300–304 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongsong, Yang Jing, Fu Wei, Wang Kelin. 2012. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill– slope with different land–use types in northwest Guangxi[J]. *Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(16): 121– 126 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weihai. 2006. An outline of speleology research progress[J]. *Geological Review*, 52(6): 783– 792(in Chinese with English abstract).
- Chen Weiyan, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, Qin Luoyi, Zhang Siyu. 2013. Drainage network distribution and its master natural factors in Guizhou province[J]. *Earth and Environment*, 41(3):193–202 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yudao, Cheng Yaping, Wang Heng, Jiang Yaping, Huang Yuequn. 2013. Quantitative tracing study of hydraulic and geometric parameters of a karst underground river: exemplified by the Zhaidi underground river in Guilin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(5):11– 15 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhihua, Chen Gang, Jin Juanli, Jiang Zhongcheng. 2003. A preliminary evaluation of the capacity to storage groundwater of epi–karst zone in Southwest karst mountain of China[C]//Study on the Karst Underground Water and Rocky Desertification of China (editor: China Geological Survey). Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 180–188(in Chinese with English abstract).
- Dawson T E. 1993. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant– plant interactions. *Oecologia*, 95(4):565–574.
- Deng Yan, Jiang Zhongcheng, Cao Jianhua, Li Qiang, Lan Funing. 2004. Characteristics comparison of the leaf anatomy of *Cyclobalanopsis glauca* and its adaption to the environment of typical karst peak cluster areas in Nongla[J]. *Guihaia*, 24(4): 317– 322 (in Chinese with English abstract).
- Fairbridge R W. 1978. Carbonate rock and paleo–climate[M]//Developments in Sedimentology– Carbonate Rock (Editors: Chilinger G V, Bissell H J, Fairbridage R W. Translators: Feng Zengzhao, Wang Xiao, Pan Yucai, Fan Jiasong, Fang Shaoxian, Qiang Zhitong, Zhao Youhang, Li Guyou, Luo Zhitang). Beijing: China Petrochemical Press, 232–255.
- Falkowski P, R. J. Scholes, E. Boyle. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system[J]. *Science*, 290(13): 291–296.
- Ford D C, William P. 2007. W. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. Chichester: John Willy & Sons, 1–562.
- Gan Fuping, Li Jinming, Li Huaqing, Lu Chengjie, Wei Jiyi. 2006. The application of the cross–hold electromagnetic wave– penetrating method to detecting karst[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 30(4): 303–307 (in Chinese with English abstract).
- Gan Fuping, Yu Liping, Li Huaqing, Lu Chengjie, Wei Jiyi. 2010.

- Detection of groundwater conduits by integrated geophysical methods[J]. *Geology and Resources*, 19(3): 262–266 (in Chinese with English abstract).
- Golubic S, Krumbein W, Schneider J. 1978. The Carbon Cycle[M]. *The Biology of Cyanobacteria*(editors: Carr N G, Whitton B A). Blachwell Scientific Publications Ltd. , 29–42.
- Guo Xiaojiao, Gong Xiaoping, Yuan Daoxian, Yin Jianjun, Lin Yushi, Chen Changjie. 2017. The research on hydrological processes of cave dripping water in a typical karst vadose zone—a case study in Xiaoyan Cave, Guilin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4):537–548 (in Chinese with English abstract).
- Gussone N, Eisenhauer A, Heuser A, Dietzel M, Bock B, Böhm F, Nägler, T F. 2003. Model for kinetic effects on calcium isotope fractionation ($\delta^{44}\text{Ca}$) in inorganic aragonite and cultured planktonic foraminifera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(7): 1375–1382.
- Han Xingrui. 2015. *Karst Hydrogeology*[M]. Beijing: Sciences Press, 1–331(in Chinese).
- He Shiyi, Pan Genxing, Cao Jianhua, Tao Yuxiang, Ten Yongzhong. 2000. Research on characteristics of carbon cycle in epi–karst ecological system[J]. *Quaternary Sciences*, 20(4):383–390(in Chinese with English abstract).
- He Shiyi, Michele L, Zhang Cheng, Wang Jinliang, Li Qiang. 2009. A high precision underground water tracing test technique and its applications: A case study in Maocun karst system, Guilin, Guanxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, (5): 673–678 (in Chinese with English abstract).
- He Yuanyuan. 2010. The Carbonic Anhydrase of Soil and Typical Plants Responding to Karst Process in Karst Ecosystem[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 1–68 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fen, Tang Wei, Wang Jinliang, Cao Jianhua, Yin Jianjun. 2011. The influence of allogenic water on karst carbon sink: A case study in the Maocun subterranean river in Guilin, China[J]. *Carsologica Sinica*, 30(4): 417–421 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fen, Zhang Chunlai, Yang Hui, Cao Jianhua, Li Wei, Zhou Yunchao. 2014. Achievements and prospects in the study of karst carbon sink processes and effects in China[J]. *Geological Survey of China*, 1(3): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- Huntington T G, Hooper R P, Johnson C E, Aulenbach B T, Cappellato R, Blum A E. 2000. Calcium depletion in a southeastern United States forest ecosystem[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5):1845–1858.
- Jandl R, Alewell C, Prietzel J. 2004. Calcium loss in Central European forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2): 588–595.
- Ji Feiteng, Li Nan, Deng Xin. 2009. Calcium contents and high calcium adaptation of plants in karst areas of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(5): 926–935 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guanghui, Chen Kunkun, Yu Shi, Peng Wen. 2009. Separating karst slope run–off in peak cluster area[J]. *Journal of China Hydrology*, (6): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Youxu, Lu Junpei. 1991. *Tropical Forest Ecosystem of Jianfengling, Hainan, China*[M]. Beijing: Science Press, 1–236(in Chinese).
- Jiang Zhongcheng. 1998. Features of epi–karst zone in South China and formation mechanism[J]. *Tropical Geography*, 18(4): 322–326 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Cao Jianhua, Qin Xiaoqun, He Shiyi, Zhang Cheng. 2012. A study of carbon sink capacity of karst processes in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(2): 129–134 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Nianzhi. 2006. *Oceanic Microbial Ecology*[M]. Beijing: Science Press, 1–580(in Chinese).
- Jiao Nianzhi, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long–term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 8(8): 593–599.
- Kang Zhiqiang. 2012. Hydrological effect of karst primal forest on epikarst zone—A case study from Maolan National Nature Reserve of Guizhou province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(6):47–50 (in Chinese with English abstract).
- Lao Wenke, Li Zhaolin. 2002. Main features and classification of epi–karst in Luota area[J]. *Carsologica Sinica*, 21(1): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- Lao Wenke, Lan Funing, Jiang Zhongcheng, Qin Xiaoqun, Xie Yunqiu, Deng Yan. 2009. Analysis on karst groundwater system and its water resources composition in Shiqihe basin[J]. *Carsologica Sinica*, 28(3): 255–262 (in Chinese with English abstract).
- Larson C. 2011. An unsung carbon sink. *Science*, 334(18):886–887.
- Lawrence G B, David M B, Shortle W C. 1995. A new mechanism for calcium loss in forest–floor soils[J]. *Nature*, 378: 162–165.
- Lew S, Lew M, Koblížek M. 2016. Influence of selected environmental factors on the abundance of aerobic anoxygenic phototrophs in peat–bog lakes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14): 13853–13863.
- Li Bin, Yuan Daoxian. 1996. Relationship between carbon cycle in karst areas and CO₂ source–sink of atmosphere – case of Guizhou karst[C]//*Relationship between Karst Development and Human Surviving, Environment, Resources and Hazards*(editors: Yuan Daoxian, Xie Yunhe). Guilin: Guangxi Normal University Publishing House, 64–70(in Chinese).
- Li Datong. 1985. Explanation of the Map of Soluble Rock Types in China[M]. Beijing: SinMaps, 1–38(in Chinese).
- Li Huaqing, Lu Chengjie, Wei Jiyi, Lao Wu. 2008. CT– between electromagnetic detection revealed reservoir dam foundation karst morphological characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 29:

- 607–610 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiang, He Yuanyuan, Cao Jianhua, Liang Jianhong, Zhu Minjie. 2011. The plant carbonic anhydrase at karst area and its ecological effects[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 20(12): 1867–1871(in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Yu Longjiang, Yuan Daoxian. 2005. A study of the activity and ecological significance of carbonic anhydrase from soil and its microbes from different karst ecosystems of Southwest China[J]. *Plant and Soil*, 272(1/2): 133–141.
- Li Wei, Zhou Pengpeng, Jia Liping. 2009. Limestone dissolution induced by fungal mycelia, acidic materials, and carbonic anhydrase from fungi[J]. *Mycopathologia*, 167(1): 37–46.
- Li Xiaofang, Cao Jianhua, Yang Hui, Xu Xiangming, Mo Bing. 2008. Effect of the limestone soil with rich calcium on the lamina anatomical structure of *Loropetalum chinense*[J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Sciences*, 21(3): 412–416 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiteng, Wu Yanyou, Hao Jianchao. 2005. Relationship between Carbonic anhydrase and environment in karst area and its significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(3): 252–256(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun. 1980. *Sedimentology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–498(in Chinese).
- Liu Zaihua. 2007. *Dynamics of Karst Process and Environment*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–237(in Chinese).
- Liu Zaihua, Dreybrodt W. 1998. Dissolution kinetics of calcite in CO₂-H₂O solutions in turbulent flow: the role of the diffusion boundary layer and the slow reaction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(4):340–348(in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, Dreybrodt W, Li Huaju. 2006. Comparison of dissolution rate-determining mechanisms between limestone and dolomite[J]. *Earth Science*, (31)3: 411–417(in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, Groves C, Yuan Daoxian, Jiang Meiman. 2004. South China karst aquifer storm-scale hydrochemistry[J]. *Groundwater*, 42(4): 491–499.
- Liu Zaihua, Wu Kongyun, Wang Jinliang, Li Qiang, Sun Hailong, Han Jun. 2006. In situ precise measurement of erosion rates of carbonate rock blocks under flowing non-karst water using micro-erosion meter and the rate-determining factors[J]. *Geochimica*, 35(1): 103–110 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, Yuan Daoxian. 2000. Features of geochemical variations in typical epi-karst systems of China and their environmental significance[J]. *Geological Review*, 46(3): 324–327(in Chinese with English abstract).
- Liu Zaihua, Zhao Jinbo. 2000. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink[J]. *Environmental Geology*, 39(9): 1053–1058.
- Liu Zhili. 1990. *Introduction of Algae Fossil*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1–491(in Chinese).
- Lu Meigui, Cao Jianhua, He Xunyang. 2006. The comparative study of biogeochemistry between limestone soil and red soil in Maocun, Guilin[J]. *Guangxi Sciences*, 13(1): 58–64 (in Chinese with English abstract).
- Ma Teng, Wang Yanxin, Ma Rui, Yan Chunmiao, Shan Huimei, Chen Liuzhu. 2012. Evolution of middle-low temperature carbonate geothermal system in Taiyuan, Northern China[J]. *Earth Science*, 37(2):229–237(in Chinese with English abstract).
- Merkel B, Planer F B. 2005. *Groundwater Geochemistry*[M]. Berlin Heidelberg Springer-Verlag, 1–200.
- Mo Resheng, Qiu Shumin. 2006. Exploitation and utilization of karst underground water in Guangxi province. In: *Exploitation and utilization of karst underground water of Southwest China*(editors: China Geological Survey, Institute of Karst Geology, the Chinese Academy of Geological Science) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 62–72(in Chinese).
- National Research Council. 2001. *Basic Research Opportunities in Earth Science*[M]. Washington D C: National Academies Press, 1–168.
- National Research Council. 2012. *New Research Opportunities in the Earth Sciences*[M]. Washington D C: National Academies Press, 1–117.
- Nie Yueping. 1994. Karst development characteristics under the lithologic control of carbonate rocks – a case study in South-central Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 13(1):31–36(in Chinese with English abstract).
- Nie Yunpeng, Chen Hongsong, Wang Kelin, Tan Wei, Deng Pengyan, Yang Jing. 2011. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China[J]. *Plant & Soil*, 341(1–2): 399–412.
- Ou Zulan, Su Zongming, Li Xiankun. 2004. Flora of Karst vegetation in Guangxi[J]. *Guihaia*, 24(4): 302–310 (in Chinese with English abstract).
- Pei Jianguo, Liang Maozhen, Chen Zhen. 2008. Classification of karst groundwater system and statistics of the main characteristic values in Southwest China karst mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 27(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Peng Tao, Wang Shijie, Zhang Xinbao, Rong Li, Chen Bo, Yang Tao, Wang Jinyang. 2008. Results of preliminary monitoring of surface run-off coefficients for karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 36(2): 125–129 (in Chinese with English abstract).
- Pu Junbing, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Zhang Cheng. 2015. Some opinions on rock weathering related carbon sinks from the IPCC fifth assessment report[J]. *Advances in Earth Science*, 30(10): 1081–1090 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Shumin. 1980. *Exploration karst water*[M]. Nanning: Guangxi People's publishing House, 1–213(in Chinese).
- Qin Xiaoqun, Jiang Zhongcheng. 2005. A review on recent advances and perspective in epi-karst water study[J]. *Carsologica Sinica*, 24

- (3): 250–254 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoqun, Jiang Zhongcheng, Li Qingsong, Yi Lianxing. 2007. Distribution and exploitation of underground rivers in karst areas in Guangxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (6):10–18 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaoqun, Meng Rongguo, Mo Risheng. 2011. Influence of land covers on carbon sink of underground river: A case in the Dagouhe basin in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 13(4):372–378 (in Chinese with English abstract).
- Ren Meie. 1982. Preliminary study on karst development in China. In: *Proceeding Selected Papers from the 2nd Karst Symposium of China* (editor: organizer of the 2nd karst symposium of China)[M]. Beijing: Science Press, 1–4 (in Chinese).
- Shi Peng, Chen Xi, Qu Simin, Zhang Zhicai, Ma Jianliang. 2010. Regional frequency analysis of low flow based on L–moments: case study in karst area, Southwest China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(5):370–377.
- Song Ang, Peng Wenjie, He Ruoxue, Jin Zhenjiang, Lu Xiaoxuan, Fang Junjia, Huang Binhui. 2017. Hydrochemistry characteristics in front of the Wulixia reservoir dam associated with feedback from aerobic anoxygenic phototrophic bacteria[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(2):171–179 (in Chinese with English abstract).
- Song Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoxin. 1993. *Basis on hydrogeochemistry*[M]. Beijing: China Geological Publishing House, 1–189.
- Tang Wei, Cao Jianhua, Yang Hui, Wang Hua, Tu Linling, Ying Qihe. 2014. Research on carbonate rock corrosion rate by allogenic water as exemplified by the Maocun subterranean river in Guilin[J]. *Earth and Environment*, 42(2): 207–212 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingzhang. 2006. *Exploitation and utilization of karst underground water in Guizhou Province*[M]//*Exploitation and Utilization of Karst Underground Water of Southwest China* (editors: China Geological Survey, Institute of Karst Geology, the Chinese Academy of Geological Science). Beijing: Geological Publishing House, 35–61 (in Chinese).
- Wang Pei, Hu Gang, Cao Jianhua. 2017. Stable carbon isotopic composition of submerged plants living in karst water and its eco–environmental importance[J]. *Aquatic Botany*, 140: 78–83.
- Wang Pei, Hu Qingqing, Yang Hui, Cao Jianhua, Li Liang, Liang Yin. 2014. Preliminary study on the utilization of Ca^{2+} and HCO_3^- in karst water by different sources of *Chlorella vulgaris*[J]. *Carbonates and Evaporites*, 29(2): 203–210.
- Wang Shijie, Liu Zaihua, Ni Jian, Yan Junhua, Liu Xiuming. 2017. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China[J]. *Earth and Environment*, 45(1):2–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shufang, Pang Zhonghe, He Tiezhu, Lin Pei, Liu Kai, Liu Jiurong. 2014. Study on the permeability of carbonate rock geothermal reservoir in Beijing[J]. *Journal of Engineering Geology*, 22(4):647–654 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu, Kang Xiaobo, Zhang Hua, Wang Yan. 2016. The genesis and extension of Kunming geothermal field[J]. *Carsologica Sinica*, 35(2):125–133 (in Chinese with English abstract).
- Wu Hengbing, Ma Jianmin, He Feng, Cheng Shuiping, Liang Wei, Li Jin. 2011. *Hydrophyte and Aquatic Ecological Recovery*[M]. Beijing: Sciences Press, 1–418 (in Chinese).
- Wu Yanyou, Liang Zheng, Xing Deke. 2011a. Comparison of the physiological characteristics of paper mulberry (*Broussonetia papyrifera*) and mulberry (*Morus alba*) under simulated drought stress[J]. *Guihaia*, 31(1): 92–96 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanyou, Xing Deke, Liu Ying. 2011b. The characteristics of bicarbonate used by plants[J]. *Earth and Environment*, 39(2): 273–277 (in Chinese with English abstract).
- Xia Reyuan. 2016. Groundwater resources in karst area in Southern China and sustainable utilization pattern[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 4(4):301–309.
- Xia Riyuan, Jiang Zhongcheng, Zou Shengzhang, Cao Jianhua, Qin Xiaoqun, Su Chuntian, Luo Weiqun, Zhou Lixin. 2017. Progress of hydrogeology and environmental geology comprehensive survey in karst area[J]. *Geological Survey of China*, 4(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shucheng, Yin Hongfu, Shi Xiaoyin. 2011. *Biology of the Earth: Interaction and co–Evolution between Life and earthy Environment*[M]. Beijing: Science Press, 1–345 (in Chinese).
- Xu Zexuan, Hu Bill, Davis H, Cao Jianhua. 2015. Simulating long term nitrate–N contamination processes in the Woodville Karst Plain using CFP transport model [J]. *Journal of Hydrology*, 524:72–88.
- Yang Hui, Zhang Liankai, Cao Jianhua, Yu Shi. 2011. Comparison of mineralization and chemical structure of the soil organic carbon under different land uses in Maocun karst area, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 30(4): 410–416 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianfeng, Zhang Cuiguang. 2014. Earth’s critical zone: a holistic framework for geo–environmental researches[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (3): 98–104 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizheng. 1985. Distribution of subterranean rivers in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 4(1): 92–100 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yang, Tang Jiansheng, Su Chuntian, Pan Xiaodong, Zhao Liangjie. 2014. Research advance on multi–medium flow model for karst aquifers[J]. *Carsologica Sinica*, 33(04):419–424 (in Chinese with English abstract).
- Yi Lianxing, Xia Riyuan, Tang Jiansheng, Huang Junjie. 2010. Analysis on the connecting medium structure of groundwater–

- taking the tracer tests in the experiment base of Zhaidi ground-river system as an example[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 38(11): 38–41 (in Chinese with English abstract).
- Yi Shuqi, Hu Yusheng. 1993. Soil Science[M]. Beijing: China agricultural Publishing House, 1–252(in Chinese).
- Yuan Daoxian. 1993. Carbon cycle and global karst[J]. Quaternary Sciences, 1:1–6(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 1995. Karst process sensitively responding to environmental change and recording[J]. Chinese Science Bulletin, 40(13):1210–1213(in Chinese).
- Yuan Daoxian. 1997. Modern karstology and global change study[J]. Earth Science Frontiers, 4(1–2):17–25(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 1997. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. Quaternary International, 37: 105–113.
- Yuan Daoxian. 1998. Karst dynamic system and global change[J]. Manage on Geological Science and Technology, 6: 45–56(in Chinese).
- Yuan Daoxian. 2000. Aspects on the new round land and resources survey in karst rock desertification areas of south China[J]. Carsologica Sinica, 19(2): 103–108(in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoxian. 2009. Developing on the Karst Dynamics Theory and the foundation of the International Research Center on Karst under the Auspice of UNESCO[J]. Carsologica Sinica, (28)2:VII–VIII(in Chinese).
- Yuan Daoxian, Cao Jianhua. 2008. Theory and Practice of Karst Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1–197(in Chinese).
- Yuan Daoxian, Dai Aide, Cai Wutian, Liu Zaihua, He Shiyi, Mo Xiaoping, Zhou Shiyang, Lao Wenke. 1996. Karst Water System of a Peak Cluster Catchment in South China—a bare karst region and its mathematic model[M]. Guilin: Guang Normal University Publishing House, 1–146(in Chinese).
- Yuan Daoxian, Liu Zaihua, Lin Yushi, Song Jifang, He Shiyi, Xu Shengyou, Yang Lizheng, Li Bin, Qin Jiaming, Cai Wutian. 2002. Karst Dynamic System of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–275(in Chinese).
- Yuan Daoxian, Zhang Cheng. 2008. Karst dynamics theory in China and its practice[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 355–365(in Chinese with English abstract).
- Zhang Cheng. 2011. Time-scale of karst processes and the carbon sink stability[J]. Carsologica Sinica, 30(4):368–371 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cheng. 2011. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect[J]. Chinese Science Bulletin, 56(26): 2174–2180(in Chinese).
- Zhang Cheng, Wang Jinliang, Pu Junbing. Diel aqueous chemical cycling in a typical karst spring-fed stream: controls of biogeochemical processes. Acta Geoscientica Sinica, 36(2): 197–203(in Chinese with English abstract).
- Zhang Cheng, Xie Yunqiu, Lu Yong, Jiang Yongjun, Cao Jianhua, Jiang Guanghui, Yang Pingheng, Wang Dongyin. 2006. Impact of Land-use patterns upon karst processes: Taking Nongla Fengcong depression area in Guangxi as an example[J]. Acta Geographica Sinica, 61(11): 1181–1188(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fei, Liu Jihua, Li Qiang, Zou Lijie, Zhang Yao. 2016. The research of typical microbial functional group reveals a new oceanic carbon sequestration mechanism—A case of innovative method promoting scientific discovery[J]. Scientia Sinica Terrae, 46 (1): 9–17(in Chinese).
- Zhang Jixie. 2006. Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1–449(in Chinese).
- Zhang Zhicai, Chen Xi, Cheng Qinbo, Peng Tao, Zhang Yanfang, Ji Zhonghua. 2011. Hydrogeology of epi-karst in karst mountain—A case study of the Chenqi catchment[J]. Earth and Environment, 39 (1): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Mingqiu, Cao Jianhua, Guo Fang. 2007. Analysis on the carbon amounts originated by the weathering of carbonate rocks and the influence of soils on the carbon turnover process in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 26(3):202–206(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹建华, 王福星, 黄俊发, 黄基富, 王晶. 1993. 桂林地区石灰岩表面生物岩溶溶蚀作用[J]. 中国岩溶, 12(1):11–22.
- 曹建华, 杨慧, 康志强. 2011. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探:以珠江流域为例[J]. 科学通报, 56(26):2181–2187.
- 曹建华, 袁道先. 1999. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水及生态意义[J]. 地球化学, 28(3):243–256.
- 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 2001. 岩溶动力系统中生物作用机制[J]. 地质前缘, 8(1):203–209.
- 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 2003. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 18(1):37–44.
- 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 姜光辉. 2004. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响[J]. 地球与环境, 32(1): 90–96.
- 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 2004. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, (1):1–8.
- 曹建华, 周莉, 杨慧, 卢茜, 康志强. 2011. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究[J]. 第四纪研究, 31 (3): 431–437.
- 曹建华, 朱敏洁, 黄芬, 卢茜. 2011. 不同地质条件下植物叶片中钙形态对比研究—以贵州茂兰为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(3): 251–260.
- 常勇, 姜光辉, 康彩霞, 于爽. 2010. 峰丛洼地坡面径流过程——以丫吉试验场为例[J]. 水文, (6):19–23.
- 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 夏日元, 邹胜章, 苏春田, 罗书文. 2016. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J]. 水文地质工程地质, (43)

- 5:42-46.
- 陈宏峰,朱明秋,夏日元,唐健生,梁彬. 2005. 湖南洛塔干河猪场表层岩溶泉BP人工神经网络分析[J]. 中国岩溶, (4):300-304.
- 陈洪松,杨静,傅伟,何菲,王克林. 2012. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 28(16):121-126.
- 陈伟海. 2006. 洞穴研究进展综述[J]. 地质论评, 52(6): 783-792.
- 陈伟燕,王世杰,白晓永,秦罗义,张斯屿. 2013. 贵州喀斯特地区河网分布规律及其主控要素分析[J]. 地球与环境, 41(3): 193-202.
- 陈余道,程亚平,王恒,蒋亚萍,黄月群. 2013. 岩溶地下河管道流和管道结构及参数的定量示踪—以桂林寨底地下河为例[J]. 水文地质工程地质, 40(5):11-15.
- 陈植华,陈刚,靖娟利,蒋忠诚. 2003. 西南岩溶石山表层带岩溶水资源调蓄能力初步评价[M]//中国地质调查局(主编). 中国岩溶地下水与石漠化研究. 南宁:广西科学技术出版社, 180-188.
- 邓艳,蒋忠诚,曹建华,李强,蓝美宁. 2004. 弄拉典型峰丛岩溶区青冈栎叶片形态特征及对环境的适应[J]. 广西植物, 24(4): 317-322.
- Fairbridge R W. 1978. 碳酸盐岩与古气候[M]//沉积学的进展——碳酸盐岩(G V 奇林格等主编,冯增昭等译). 北京:石油化学工业出版社, 232-255.
- 甘伏平,喻立平,黎华清,卢呈杰,韦吉益. 2010. 利用综合物探方法探测地下水流通道[J]. 地质与资源, 19(3): 262-266.
- 甘伏平,李金铭,黎华清,卢呈杰,韦吉益. 2006. 跨孔电磁波透视法在岩溶探测中的应用[J]. 物探与化探, 30(4): 303-307.
- 郭小娇,龚晓萍,袁道先,殷建军,姜光辉,林玉石,陈长杰. 2017. 典型岩溶包气带洞穴滴水水文过程研究[J]. 地球学报, 38(4):537-548.
- 韩行瑞. 2015. 岩溶水文地质学[M]. 北京:科学出版社, 1-331.
- 黄芬,张春来,杨慧,曹建华,李为,周运超. 2014. 中国岩溶碳汇过程与效应研究成果及展望[J]. 中国地质调查, 1(3): 57-66.
- 黄芬,唐伟,汪进良,曹建华,殷建军. 2011. 外源水对岩溶碳汇的影响—以桂林毛村地下河为例[J]. 中国岩溶, 30(4): 417-421.
- 何师意,潘根兴,曹建华,陶于祥,滕永忠. 2000. 表层岩溶生态系统碳循环特征研究[J]. 第四纪研究, 20(4):383-390.
- 何师意,章程,汪进良,李强. 2009. 高精度地下水示踪技术及其应用—以毛村地下河流域为例[J]. 地球学报, (5): 673-678.
- 何媛媛. 2010. 岩溶生态系统中土壤及典型植物碳酸酐酶对岩溶作用的影响[D]. 桂林:广西师范大学, 1-68.
- 姬飞腾,李楠,邓馨. 2009. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J]. 植物生态学报, 33(5): 926-935.
- 姜光辉,陈坤琨,于爽,彭稳. 2009. 峰丛洼地的坡地径流成分划分[J]. 水文, (6):14-19.
- 焦念志. 2006. 海洋微生物生态学[M]. 北京:科学出版社, 1-580.
- 蒋忠诚. 1998. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. 热带地理, 18(4): 322-326.
- 蒋忠诚,袁道先,曹建华,覃小群,何师意,章程. 2012. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报, 33(2): 129-134.
- 蒋有绪,卢俊培. 1991. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统[M]. 北京:科学出版社, 1-236.
- 康志强. 2012. 喀斯特表层岩溶带原生森林的水文效应研究——以贵州省茂兰国家自然保护区为例[J]. 水土保持通报, 32(6): 47-50.
- 劳文科,李兆林. 2002. 洛塔地区表层岩溶带基本特征及其类型划分[J]. 中国岩溶, 21(1):30-35.
- 劳文科,蓝美宁,蒋忠诚,覃小群,谢运球,邓艳. 2009. 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析[J]. 中国岩溶, 28(3):255-262.
- 李彬,袁道先. 1996. 岩溶区碳循环与大气CO₂源汇关系——以贵州岩溶区为例[M]//袁道先 谢云鹤(主编). 岩溶与人类生存、环境、资源和灾害. 桂林:广西师范大学出版社, 64-70.
- 李大通. 1985. 中国可溶岩类型图说明书[M]. 北京:地图出版社, 1-38.
- 黎华清,卢呈杰,韦吉益,劳武. 2008. 孔间电磁波 CT 探测揭示水库坝基岩溶形态特征[J]. 岩土力学, 29: 607-610
- 李强,何媛媛,曹建华,梁建宏,朱敏洁. 2011. 植物碳酸酐酶对岩溶作用的影响及其生态效应[J]. 生态环境学报, 20(12):1867-1871.
- 李西腾,吴沿友,郝建朝. 2005. 喀斯特地区碳酸酐酶与环境的关系及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, (24)3: 252-256.
- 李小方,曹建华,杨慧,徐祥明,莫彬. 2008. 富钙偏碱的岩溶土壤对櫟木叶片显微结构的影响[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版, 21(3): 412-416.
- 刘宝珺. 1980. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社, 1-498.
- 刘再华. 2007. 岩溶作用动力学与环境[M]. 北京:地质出版社, 1-237.
- 刘再华, Dreybrodt W. 1998. 流动CO₂-H₂O系统中方解石溶解动力学机制——扩散边界层效应和CO₂转换控制[J]. 地质学报, 72(4): 340-348.
- 刘再华, Dreybrodt W, 李华举. 2006. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. 地球科学, (31)3: 411-417.
- 刘再华,吴孔运,汪进良,李强,孙海龙,韩军. 2006. 非岩溶流水中碳酸盐岩试块的侵蚀速率及其控制因素:以湖南郴州礼家洞为例[J]. 地球化学, 35(1): 103-110.
- 刘再华,袁道先. 2000. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. 地质论评, 46(3): 324-327.
- 刘志礼. 1990. 化石藻类学导论[M]. 北京:高等教育出版社, 1-491.
- 卢玫桂,曹建华,何寻阳. 2006. 桂林毛村石灰土和红壤元素生物地球化学特征研究[J]. 广西科学, 13(1): 58-64.
- 马腾,王焰新,马瑞,闫春森,单慧媚,陈柳竹. 2012. 太原盆地碳酸盐岩中—低温地热系统演化[J]. 地球科学, 37(2):229-237.
- 莫日生,邱书敏. 2006. 广西岩溶地下水资源开发利用[M]//中国地质调查局/中国地质科学院岩溶地质研究所(主编). 中国西南地区岩溶地下水资源开发与利用. 北京:地质出版社, 62-72.
- 聂跃平. 1994. 碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征—以黔中南为例[J]. 中国岩溶, 13(1):31-36.
- 欧祖兰,苏宗明,李先琨. 2004. 广西岩溶植被植物区系[J]. 广西植物, 24(4): 302-310.
- 裴建国,梁茂珍,陈阵. 2008. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶, 27(1): 6-10.
- 彭韬,王世杰,张信宝,容丽,杨涛,陈波,汪进阳. 2008. 喀斯特坡地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 36(2):125-129.

- 蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 章程. 2015. 岩石风化碳汇研究进展: 基于 IPCC 第五次气候变化评估报告的分析[J]. 地球科学进展, 30(10): 1081-1090.
- 覃小群, 蒋忠诚. 2005. 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, (3): 250-254.
- 覃小群, 蒋忠诚, 李庆松, 易连兴. 2007. 广西岩溶区地下河分布特征与开发利用[J]. 水文地质工程地质, (6): 10-18.
- 覃小群, 蒙荣国, 莫日生. 2011. 土地覆盖对岩溶地下河碳汇的影响—以广西打狗河为例[J]. 中国岩溶, 13(4): 372-378.
- 邱书敏. 1980. 岩溶找水[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1-213.
- 任美镠. 1982. 中国岩溶发育规律初步研究[M]//《第二届岩溶学术会议论文选集》编辑组(主编). 第二届岩溶学术会议论文选集. 北京: 科学出版社, 1-4.
- 沈照理, 朱宛华, 钟左焱. 1993. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1-189.
- 宋昂, 彭文杰, 何若雪, 靳振江, 卢晓漩, 房君佳, 黄炳惠, 李强. 2017. 好氧不产氧光合细菌反馈作用下的五里峡水库坝前水体化学特征研究[J]. 岩矿测试, 36(2): 171-179.
- 唐伟, 曹建华, 杨会, 王华, 涂林玲, 应启和. 2014. 外源水对碳酸盐侵蚀速率研究——以桂林毛村地下河为例[J]. 地球与环境, 42(2): 207-212.
- 王明章. 2006. 贵州省岩溶地下水资源及其开发利用[M]//中国地质调查局、中国地质科学院岩溶地质研究所(主编). 中国西南地区岩溶地下水资源开发与利用. 北京: 地质出版社, 35-61.
- 王世杰, 刘再华, 倪健, 闫俊华, 刘秀明. 2017. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J]. 地球与环境: 45(1): 2-9.
- 王树芳, 庞忠和, 何铁柱, 林沛, 刘凯, 刘久荣. 2014. 北京地区碳酸盐岩热储渗透性研究[J]. 工程地质学报, 22(4): 647-654.
- 王宇, 康晓波, 张华, 王燕. 2016. 昆明地热田的成因与外延[J]. 中国岩溶, 35(2): 125-133.
- 吴振斌, 马剑敏, 贺峰, 成水平, 梁威, 李今. 2011. 水生植物和水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 1-418.
- 吴沿友, 梁铮, 邢德科. 2011a. 模拟干旱胁迫下构树和桑树的生理特征比较[J]. 广西植物, 31(1): 92-96.
- 吴沿友, 邢德科, 刘莹. 2011b. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. 地球与环境, 39(2): 273-277.
- 谢树成, 殷鸿福, 史晓颖. 2011. 地球生物学: 生命与地球环境的相互作用和协同演化[M]. 北京: 科学出版社, 1-345.
- 夏日元, 蒋忠诚, 邹胜章, 曹建华, 覃小群, 苏春田, 罗为群, 周立新. 2017. 岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展[J]. 中国地质调查, 4(1): 1-10.
- 杨立铮. 1985. 中国南方地下河分布特征[J]. 中国岩溶, 4(1): 92-100.
- 杨慧, 张连凯, 曹建华, 于爽. 2011. 桂林毛村岩溶区不同土地利用方式土壤有机碳矿化及土壤碳结构比较[J]. 中国岩溶, 30(4): 410-416.
- 杨建锋, 张翠光. 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, (3): 98-104.
- 杨杨, 唐建生, 苏春田, 潘晓东, 赵良杰. 2014. 岩溶区多重介质水流模型研究进展[J]. 中国岩溶, 33(4): 419-424.
- 易连兴, 夏日元, 唐建生, 黄俊杰. 2010. 地下水连通介质结构分析—以寨底地下河系统实验基地示踪试验为例[J]. 工程勘察, 38(11): 38-41.
- 易淑荣, 胡预生. 1993. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1-252.
- 袁道先. 1993. 碳循环与全球岩溶[J]. 第四纪研究, (1): 1-6.
- 袁道先. 1995. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 40(13): 1210-1213.
- 袁道先. 1997. 现代岩溶学和全球变化研究[J]. 地质学前沿, 4(1-2): 17-25.
- 袁道先. 1998. 岩溶动力系统 and 全球变化[J]. 地质科技管理, (6): 45-56.
- 袁道先. 2009. 岩溶动力学理论的发展与国际岩溶研究中心的成立[J]. 中国岩溶, (28)2: VII-VIII.
- 袁道先, 曹建华. 2008a. 岩溶动力学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1-197.
- 袁道先. 2000. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 19(2): 103-108.
- 袁道先, 戴爱德, 蔡五田, 刘再华, 何师意, 莫小平, 周世英, 劳文科. 1996. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究: 以桂林丫吉村为例[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1-146.
- 袁道先, 刘再华, 林玉石, 沈继芳, 何师意, 徐胜友, 杨立铮, 李彬, 覃嘉铭, 蔡五田. 2002. 中国岩溶动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 1-275.
- 袁道先, 章程. 2008. 岩溶动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 29(3): 355-365.
- 章程. 2011a. 岩溶作用时间尺度与碳汇稳定性[J]. 中国岩溶, 30(4): 368-371.
- 章程. 2011b. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. 科学通报, 56(26): 2174-2180.
- 章程, 汪进良, 蒲俊兵. 2015. 地下河出口河流水化学昼夜动态变化—生物地球化学过程的控制[J]. 地球学报, 36(2): 197-203.
- 章程, 谢运球, 吕勇, 蒋勇军, 曹建华, 姜光辉, 杨平恒, 王银. 2006. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响—以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 地理学报, 61(11): 1181-1188.
- 张飞, 刘纪化, 李强, 邹丽洁, 张瑶. 2015. 从微型生物功能类群研究到海洋储碳机制的新认识—方法创新带动科学发现的一个典型案例[J]. 中国科学: 地球科学, 46(1): 9-17.
- 张继谢. 2006. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 1-449.
- 张志才, 陈喜, 程勤波, 彭韬, 张艳芳, 纪忠华. 2011. 喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析—以陈旗小流域为例[J]. 地球与环境, 39(1): 19-25.
- 朱明秋, 曹建华, 郭芳. 2007. 基于碳酸盐岩风化的碳源分析及土壤的影响作用机制[J]. 中国岩溶, 26(3): 202-206.