

西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望

马明国^{1,2}, 汤旭光^{1,2}, 韩旭军^{1,2}, 时伟宇^{1,2}, 宋立生^{1,2}, 黄 静^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院 自然资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 400715;

2. 西南大学地理科学学院 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715)

摘 要:岩溶地区碳循环具有地表与地下双层结构的相互渗透、有机与无机碳循环的相耦合以及生物与非生物过程的相关联等特征, 相对于其他陆地生态系统更为特殊和复杂。中国西南地区是全球最大范围的喀斯特连续出露地区, 前期研究表明该区域的碳循环路径与过程是基本清晰的, 但岩石-土壤-植被-大气-水不同界面间的碳通量及迁移转化机制仍然不明确, 亟待开展小流域尺度碳循环各个分量的精细观测, 以及区域尺度的碳循环遥感估算和模型模拟工作。论文对西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究的进展进行了梳理, 在此基础上展望下一步需要重点开展的工作, 该研究可以为评估全球气候变化对该地区影响及制定适应对策提供参考。

关键词:碳循环; 地面观测; 遥感; 过程模型; 西南地区

全球变化研究一直是当前热点问题(Piao et al, 2009; 方精云等, 2011), 近年来大气中CO₂浓度的上升对全球变化产生了重要影响, 碳循环及其变化受到国际学术界广泛的关注, 成为全球变化研究的核心问题之一(裴建国等, 2012)。目前, 关于碳循环研究的一个重要问题是全球大气CO₂的收支不平衡, 存在一个很大的遗漏汇, 约2.8 Pg C·a⁻¹(Melnikov et al, 2006)。目前针对遗漏碳汇的分析主要集中在海洋、植被和土壤、大气3个碳库的CO₂循环机理上, 认为岩溶作用是长时间尺度的碳循环, 从而没有考虑其吸碳的作用(裴建国等, 2012)。根据IGCP379报告提供的结果, 中国因碳酸盐岩的溶蚀作用可以从大气中吸收碳0.018 Pg C·a⁻¹, 而全球碳酸盐岩所产生的碳汇可以达到0.6 Pg C·a⁻¹(刘再华, 2001; 蒲俊兵等, 2015)。但以上估计结果存在较大的不确定性, 因此对岩溶系统碳通量开展深入观测、分析与研究具有十分重要的意义, 对全球遗漏碳汇的分析和碳循环模型的改进都有很好的促进作用。对全球碳循环的系统研究已有几十年的

历史, 至今已取得很多重要成果, 但对占整个地球陆地面积约10%的岩溶地区碳循环的研究却在近10~20 a来才逐渐受到重视(罗维均等, 2014)。

中国西南岩溶地区是世界上连片分布面积最大、岩溶发育最强烈的区域, 通过对该地区典型岩溶生态系统碳循环各个分量的精细观测与模拟, 可以为全球岩溶地区碳循环研究提供案例, 这对促进陆地碳循环研究意义重大, 可为全球“遗漏汇”问题的解决作出贡献(Bourges et al, 2012)。但是岩溶地区碳循环具有地表与地下双层结构的相互渗透、有机与无机碳循环的相耦合以及生物与非生物过程的相关联等特征, 导致其相对于其他陆地生态系统更为特殊和复杂(Yan et al, 2011)。土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 对全球气候变化的影响不容忽视, 尤其是岩溶区土壤在岩溶动力系统影响下对大气CO₂的源汇效应(Inglisma et al, 2010; Ramnarine et al, 2012)。陆地表面几乎所有变量都具有高度的时间和空间的异质性, 从而导致对它们观测和模拟都存在很大的不确定性。就观测

收稿日期: 2018-08-09; 修订日期: 2019-04-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771453, 41830648); 国家重点研发计划支持项目(2016YFC0500106)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771453 and 41830648; National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0500106.]

第一作者简介: 马明国(1976—), 男, 教授, 主要从事生态和陆面过程观测与模拟研究。E-mail: mmmg@swu.edu.cn

引用格式: 马明国, 汤旭光, 韩旭军, 等. 2019. 西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望 [J]. 地理科学进展, 38(8): 1196-1205. [Ma M G, Tang X G, Han X J, et al. 2019. Research progress and prospect of observation and simulation of carbon cycle in the karst areas of Southwest China. Progress in Geography, 38(8): 1196-1205.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.008

而言,岩溶地区的碳通量观测相对于其他区域还显得十分不足,特别是对地表与地下双层结构的碳循环通量精细的观测亟待加强。从模型方面而言,现有的生态模型和碳循环模型通常都包含了许多先验假设的复杂的模型参数化方案和相当多的参数,这些模型对地表过程的模拟精度依然不足。这一方面固然源于现有的模型还远未臻完美,各种物理过程的认识和参数化方案还有待改进;另一方面也是因为观测的局限性导致很难确定某一特定地区(例如西南岩溶地区)陆面状况的初始值和水、热、植物生理参数值(李新等, 2010)。这些观测和模拟的不确定性也导致了喀斯特地区碳平衡估算存在较大的不确定性。为了更精确地表达西南岩溶地区碳循环过程的动态演进,实现区域碳循环的高精度估计,就必须尝试新的思路,综合多源信息(例如地面的精细观测和遥感高精度估计),并应用机器学习和深度学习等先进方法去应对复杂性、不确定性和尺度转换等相互交织的问题(Li, 2014)。

1 研究进展

1.1 碳通量观测

针对岩溶地区开展碳循环的深入研究,首先要获取精细的观测数据(Yuan, 1997)。对表层岩溶系统的碳汇定位观测主要包括标准溶蚀片和水化学法。标准溶蚀片是在标准的石灰岩试片或者样点岩石上开展溶蚀速率的观测,建立溶蚀速率模型(Yuan, 1997)。水化学法则是通过测量泉口或地下河出口流水所携带的溶质浓度和径流量,计算出水流所携带的各种离子总量,再根据流域内岩石分布推算不同岩石的风化速度(Liu et al, 2006)。对于土壤呼吸的监测方法主要有微气象法和气室法,两者分别适用于大尺度流域范围和小尺度样点的土壤呼吸测定(Zhang et al, 2014)。岩溶地区普遍发育洞穴、管道、孔隙-裂隙等地下空间,容易形成“烟囱效应”,其 CO_2 浓度受洞内外温度差和气压差影响很大,产生不同时间尺度上的变化,需要开展精细的观测(Sherwin et al, 2011)。开展岩溶地区系统的碳循环研究还需要涡度相关和同位素示踪技术相结合,并有全球联网研究的必要性(Yan et al, 2011)。同位素技术可以对水体、土壤和植被中的碳源进行示踪(Florea, 2013),而涡度相关方法可获取区域范围内的碳通量总体特征(Goulden et al, 1996)。洞

穴-土壤-植被-大气-水五位一体的同步监测以及涡度相关-稳定同位素等技术的联合应用将是岩溶地区精细观测的发展方向(王世杰等, 2017)。

在岩溶地区通过涡动相关系统开展碳通量观测相对较少,在斯洛文尼亚岩溶地区分别针对草地和次生演替树/灌丛地开展了涡动相关系统的碳通量测量,前者为碳源($353 \pm 72 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),后者为碳汇($-126 \pm 14 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)(Ferlan et al, 2011)。近期,中国也在西南岩溶地区布设了大量涡动相关系统通量观测站,例如中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站、中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站和重庆市金佛山喀斯特生态系统野外科学观测研究站,分别对亚热带湿润退耕次生林、中亚热带常绿阔叶林、马尾松林等开展野外观测研究。但相对国内其他区域,西南岩溶地区的通量观测还亟待加强。在西南岩溶地区部分站点稀疏地区增加通量观测,同时考虑站点布置下垫面类型的代表性,并和已有站点(森林)协同,可以增强碳通量观测资料在区域尺度上的代表性。

岩溶地区的区域碳循环估计是当前研究的难点。在贵州普定后寨河流域开展的水文水化学测量发现,该流域的碳酸盐岩溶蚀和风化过程可以从大气中吸存的碳平均为 $20.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。基于此观测结果进而估算出了中国西南区域和全国陆地碳酸盐岩溶蚀和风化过程可以从大气中吸存的碳为 $12 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$,这个量接近于同期57%的中国森林碳净积累量,并呈现出了增加趋势(Yan et al, 2011)。通过标准溶蚀试片法研究流域尺度岩溶作用强度及其碳汇效应,对比不同土地利用类型条件下岩溶作用的强度及其差异,数据表明原始森林产生的岩溶碳汇最大,其次是草地、林地、灌丛和耕地(Zhang, 2011)。这种监测方法是通过单点的观测来拟定参数后推广到区域尺度,由于西南地区地形、地貌、地质背景较为复杂,该结果仍存在较大不确定性。

1.2 区域尺度碳通量估算与验证

遥感技术由于可重复获取大范围的碳循环相关的重要过程变量,为区域尺度的碳循环提供高时空分辨率的估计结果(Gamon et al, 2004)。区域尺度碳通量的估算方法主要包括基于遥感资料的光能利用效率模型、基于数据驱动的尺度扩展方法、基于过程的生态系统模型。由于遥感可以实时监测区域尺度的植被状态,在区域尺度碳通量估算中

起着非常重要的作用。光能利用率模型来是利用遥感数据估算碳通量的方法中最为广泛应用的方法之一(Hilker et al, 2008)。目前应用最为广泛的GPP数据产品是NASA发布的利用MODIS数据估算全球陆地生态系统的生产力产品(MOD17A2),这个产品是根据MODIS-PSN模型估算的(Running et al, 2000)。在中国只有少数几个站点进行了验证,表明该产品明显低于涡动相关观测结果(Wu et al, 2008; Zhang et al, 2008; He et al, 2010; Wang et al, 2013)。在西南岩溶地区,受通量观测数据的限制,类似研究还较少,因此对该区域的遥感碳通量产品的验证与改进对区域碳循环的准确估算非常重要,有必要利用实测的碳通量数据对光能利用率模型的参数进行标定,然后用其可以较为准确的估算岩溶区域植被的碳通量,并利用实测的碳通量数据对遥感碳通量产品进行验证(Wang et al, 2013)。

基于生态过程的陆地生态系统碳循环模型是研究陆地生态系统与气候、大气和人类活动之间关系的重要工具之一,它可以模拟生态系统对气候变

化的响应(Medvigy et al, 2009)。陆地生态系统碳循环模型以碳元素在生态系统中的传输过程为主线,考虑植被的光合作用、凋落分解、土壤呼吸等过程,对碳循环过程进行不同复杂程度的描述(Peng, 2000)。根据模型侧重考虑的生态过程类型,将碳循环过程模拟模型大致分为3类,即地球化学过程模型、生物过程模型和陆面物理过程模型(谢馨瑶等, 2018),其各自的优点和缺陷不同(表1)。在区域尺度上广泛应用的碳循环模型主要有Biome-BGC(Thornton et al, 2002)、CENTURY (Parton et al, 1993)、LPJ (Sitch et al, 2003)、IBIS (Kucharik et al, 2000)等。

生态系统模型往往包含了大量参数,这些参数不仅存在很大的不确定性,而且随着空间或者时间发生变化,然而在区域尺度上应用模型的时候的往往很难获取合适的模型参数,因此需要利用模型数据融合方法,对模型的参数进行标定。模型数据融合方法就是通过优化模型参数或状态,从而提高模型模拟生态系统功能和过程的性能(Wang et al,

表1 碳循环过程模型特征比较
Tab. 1 Comparison of model characteristics of carbon cycle

模型类型	代表性模型	优点	缺陷	参考文献
地球化学过程模型	CENTURY 模型	综合考虑生物、土壤、水分,结合气候、人类活动、土壤性状等驱动因子	难以模拟短时间尺度内的极端气候,缺乏对光合作用过程的精细化模拟	Parton et al, 1993 Molina et al, 1997
	Biome-BGC 模型	模拟植被的动态变化与气候变化的响应	未考虑干扰因子,不适用于大尺度范围	Running et al, 1993 Thornton et al, 2002
	BEPS 模型	适用于大尺度范围,不同类型的数据兼容性强	未考虑各种扰动因子对森林生态系统生产力的影响	Stéphanie et al, 2006 Wang et al, 2014
	InTEC 模型	同时考虑气候、林分年龄及森林扰动对碳循环的影响,时间分辨率为30 d	未考虑土壤湿度变化造成植被冠层传导率对碳循环的影响	Chen et al, 2000 Ju et al, 2007
	DLEM 模型	综合考虑地球化学过程和植被动态过程,时间分辨率为1 d	模型所需参数类型多,限制其广泛的应用	Chen et al, 2000 Xu et al, 2010
生物过程模型	CASA 模型	侧重考虑光合作用过程,能通过光合有效辐射和光能利用率等估算植被生产力	未考虑散射辐射、直接辐射等其他因素而导致模型在阴天时存在低估的现象	Potter et al, 1993 Li et al, 2012
	MPASS 模型	侧重于植被冠层辐射传输和水分传输等过程,用于模拟全球潜在植被的分布状况	该模型主要依据于北美与欧洲的气候和植被的分布关系所创建,用于我国西南岩溶区会有一定的误差	Neilson et al, 2010 赵茂盛等, 2002
陆面物理过程模型	LPJ-GUESS 模型	可以模拟多种尺度的陆地生态系统的结构和功能	未涉及氮循环、人类活动及土地利用变化的干扰	Smith et al, 2001 Sitch et al, 2003
	AVIM 模型	能够较好的模拟区域尺度陆地生态系统能量传输过程	忽略植被类型间的竞争关系以及植被季节演替过程中对模型参数的影响	Ji et al 1995
	SiB 系列模型	重点考虑了生物物理反馈过程CO ₂ ,对温度、蒸散发及能量平衡的模拟效果较好	忽略了土壤呼吸、土壤水分、局部小气候以及植被叶片到冠层的尺度变化	Sellers, 1985 Hanan et al, 2005
	IBIS 模型	综合考虑了地球物理、化学和生物过程,能够耦合大气环流模式,能够模拟复杂的、时间跨度大的碳循环过程,在区域尺度和全球尺度都能得到广泛的应用	不适用于模拟精确的生态学过程,其温度函数和呼吸系数容易造成计算结果的误差	Kucharik et al, 2000 Yuan et al, 2014 Christopher et al, 2006

2009; Xiao et al, 2014)。碳循环方面的模型数据融合研究在近 10 a 来大量的涌现(Braswell et al, 2005; Xu et al, 2006; Wang et al, 2009; Xiao et al, 2014)。通过模型数据融合方法将过程模型和多源观测数据结合到一起,可以提高岩溶区域碳循环的模拟精度,将有助于深入认识岩溶区域碳循环的机理。例如利用包括蒙特卡洛-马尔可夫链(Monte Carlo Markov Chain, MCMC)和卡尔曼滤波在内的方法融合观测数据优化模型的不确定参数从而提高模型精度。

此外,陆地生态系统碳循环是植被与气候环境综合作用确定的过程。在众多气候要素中,特别是太阳辐射,作为地球表层物理、化学和生物过程的主要能量来源,也是生物地球化学循环模拟及动态全球植被模型的关键参数(Frolking et al, 1998; Van Laake et al, 2005; 董泰锋等, 2011)。当前,碳循环区域估算模型所需要的光合有效辐射(PAR)主要是利用站点气象资料参数化进行空间插值获取,事实上随着对生态系统模型的研究深入,当前方法已经无法满足研究者对空间精度的要求,尤其是在气象条件复杂的西南地区。目前,国际上尚缺乏长时间序列的 PAR 数据,间接地限制了碳循环遥感模型的精度,因此如何借助于遥感数据获取长期的 PAR 时空动态也是当前全球变化领域关注的热点之一。

中国陆地生态系统土壤呼吸量具有明显的空间异质性特征,其分布特征与降水和温度有很大相关性,西北干旱半干旱区与青藏高原区的土壤呼吸量较低,西南地区最高,土壤呼吸量与土壤有机碳也有一定的关系,例如中国的东北地区。已有研究表明全球土壤碳库约为 1220~1576 Pg C(Tarnocai et al, 2009),中国约为 89 Pg C(于东升等, 2005)。土壤呼吸过程产生的 CO_2 包括土壤有机碳的微生物分解和植物的根系呼吸作用,从生态层面来说降水是决定陆地生态系统碳循环的过程的关键性因素。从生态系统层面来说,土壤呼吸的年际间变异与降水关系也在某种程度上验证了生态学中的经典理论—降水是决定陆地生态系统碳循环过程的关键因素(Mcculley et al, 2005)。Yang 等(2012)观测表明喀斯特泉水水化学的季节动态、日动态以及暴雨动态对土壤 CO_2 变化始终表现出很好的响应,响应的时间间隔主要取决于地下水的补给模式。长期观测数据表明,全球变暖和土地利用变化均可通过增加土壤 CO_2 含量导致岩石风化碳汇增加(刘再

华, 2012)。在流域面积和岩性固定的情况下,岩石风化碳汇的强度将取决于气候(Hagedorn et al, 2009)、土地利用和覆盖的变化(Zhao et al, 2010)等环境和人为因素。

近年来,有关团队针对西南岩溶地区植被碳循环监测与模拟开展了一些研究工作,得出的结论主要体现在该区域的植被覆盖普遍存在显著改善的趋势。在人类活动方面,植被退化现象受人类活动的影响较大,而人类活动对植被改善影响较小,植被改善主要与植物的自然生长演替有关(任扬航等, 2016)。基于 LPJ-GUESS 模型和长时间序列遥感监测数据,发展了大区域尺度生态工程成效识别与厘定方法,结果表明西南喀斯特地区植被恢复演变特征与生态工程的实施具有较好的一致性,生态工程背景下西南喀斯特地区可能有巨大的固碳潜力(Tong et al, 2018)。但一些过度追求经济利益的矿产开发和不合理的耕种与管理模式,导致一些地区的石漠化仍存在扩大趋势(Yang et al, 2017)。

1.3 碳循环特征及环境因子分析

大气 CO_2 浓度的季节和年际波动是大气与全球陆地生态系统之间碳交换的变化造成的。生态系统碳通量的年际变化现象广泛存在于各种陆地生态系统中,其变化原因主要包括:气候、生理过程、物候、生态系统结构、生态系统营养物质循环和干扰等因素(Hui et al, 2003; Richardson et al, 2007; Marcolla et al, 2011)。岩溶过程相关的碳循环,作为全球碳循环的重要组成部分,显著地影响着全球碳平衡(Yuan, 1997; Liu et al, 2010),然而,以往在全球碳循环研究中把地质作用作为一种中长时间尺度的作用而存在,因而岩溶作用被忽视(袁道先, 1999)。当前对岩溶地质碳汇效应对全球碳汇的重要作用逐渐得到重视。对岩溶区由于溶蚀作用而产生的碳汇主要根据石灰岩溶蚀试片法、水化学法和扩散边界层理论(DBL)等方法估算(袁道先等, 2016)。目前,国内外已有众多关于岩溶作用碳效应及其驱动机制的研究,然而,当前关于岩溶作用对全球碳收支的贡献大小估算研究尚缺乏统一的定论(Jiang et al, 1999; Philippe, 2002; Yuan et al, 2002; Cao et al, 2012)。

现代岩溶学研究成果表明,碳酸盐岩在全球碳循环中响应极其迅速,水循环过程中的碳汇效应显著(裴建国等, 2012)。大量岩溶地区碳循环研究集中在对地下水、河流、地下河、降水等水循环过程对

碳循环的影响(Liu et al, 2004; Yamanaka, 2012; Du et al, 2014)。喀斯特作用碳循环是“水-岩-气-生”相互作用的结果,其作用过程较为复杂。岩溶地质碳汇包括碳酸盐和硅酸盐的碳汇效应,在短时间尺度上,碳酸盐风化碳汇占整个岩石风化碳汇的94%(刘再华, 2012)。典型岩溶动力系统的观测实验表明,处于岩石圈、大气圈、生物圈、水圈4大圈层交汇部位的表层岩溶系统对环境变化敏感,表现出明显的日变化、季节变化和年变化,并积极参与全球碳循环(Liu et al, 2004; Zhang et al, 2005)。因此,对岩溶地区的碳循环要综合考虑生态和水文过程,Yan等(2012)以水-岩-土-气-生相互作用的生物地球化学过程为出发点,解析各圈层间碳交换的途径和通量,构建喀斯特地区碳循环模式图。

目前对于岩溶地质碳汇效应的敏感性研究尚存在争议。一般认为,主要的控制因素包括地质作用、地形地貌、气候(如降雨和气温)、植物光合作用和呼吸作用,以及土地利用等人为作用等,这些因素共同影响着岩溶碳的产生和转化,很难在自然界中对它们的相对贡献进行区分。对于不同区域而言,碳汇效应的主导因素不同,因而对碳汇效应的影响因素研究存在差异。研究表明,土壤空气中CO₂的增加会导致碳酸盐岩溶蚀作用的加剧,碳酸氢根离子含量也相应增加,且与气温、降雨动态密切相关(Liu et al, 2004; Liu et al, 2015),全球变暖或降雨量增多会使土壤呼吸加剧。

2 研究展望

从前面的分析可以看出,岩溶地区的碳循环具有很强的区域特色,其碳通量的组成和交换过程相对于其他区域存在更大的不确定性,以中国西南为例,碳循环的观测与研究工作都还相对薄弱,亟待加强(王世杰等, 2017)。针对中国西南地区岩溶地区的碳循环问题,需要在以下方面开展相关工作。

2.1 典型小流域碳水通量精细观测

选择西南地区典型的岩溶小流域,构建洞穴-土壤-植被-大气-水五位一体、卫星-地表-地下三维立体多尺度嵌套监测系统,实现岩溶地区碳循环各个分量及与之紧密相关的陆表参数的精细观测。卫星观测方面,针对西南地区多云多雾的特点,基于可见光、红外和微波多波段、极轨卫星和静止卫星的多源卫星观测数据,获取更高频次的对地

有效观测。

针对地表观测,利用大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)和微波闪烁仪获取公里级尺度上的蒸散发观测结果,利用涡动相关仪(Eddy-covariance, EC)获取百米级尺度上的碳水通量观测结果,利用区域土壤水分观测系统(COsmic-ray Soil Moisture Observing System, COSMOS)获得百米级尺度上的土壤水分观测结果,利用自动气象站(Automatic Weather Station, AWS)获取风温湿压、辐射、降水等要素的观测结果,利用多通道土壤碳通量自动测量系统获取土壤CO₂持续观测结果,应实现土壤呼吸与气候因子、植被因子和土壤因子的同步监测,阐明多因子交互影响土壤呼吸的机制。在闪烁仪观测源区内布设叶面积指数和土壤水分无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)节点,用于获取源区关键陆表参量的空间异质性分布的特征。以上的多尺度观测可与遥感的像元尺度或模型的网格尺度相匹配,用于支持西南岩溶地区区域遥感反演算法发展和生态过程、陆表过程模型的参数拟定,并对遥感估算和模型模拟结果进行精度评价。

针对地下的洞穴和地下河开展观测,利用CO₂浓度监测仪获取洞穴内CO₂浓度变化情况,并同时获取洞穴内温湿度和气压等参数。在地下河不同段观测地下水位的变化,在地下河出口建立永久性标准堰测断面,获取最终的出口出水量监测结果。可以利用同位素方式对EC观测的CO₂通量进行分离,特别是获得洞穴CO₂通量和溶蚀量在整个通量中所占的比例,为进一步开展岩溶地区碳循环分析和模拟奠定基础。

2.2 岩溶地区碳循环特征及敏感性分析

在对观测数据进行严格的质量控制和处理分析的基础上,观测和估算得到岩溶生态系统的各碳通量组分,并结合实验观测到的相关生态参量,了解岩溶生态系统碳收支的基本特征。分析西南地区表层岩溶生态系统碳循环过程的各个分量日变化、季节变化和年际变化特征。同时,利用统计分析方法,分析岩溶生态系统碳循环特征与降雨、气温、土壤含水量、土地利用方式、植被覆盖度、叶面积指数等环境要素之间的相关关系,对岩溶地区碳循环特征的环境响应机制进行分析,特别是分析岩溶地区独特水文对碳循环的影响。此外,西南地区愈见频繁的洪涝和旱灾事件说明当地发生极端气

候的风险逐渐升高,亟待加强预测未来情景下该类事件对岩溶地区生态系统碳水循环的影响范围与程度。

2.3 岩溶地区碳循环产品验证与改进

利用涡动相关获得的GPP和实地观测的NPP,基于Footprint模型和高分辨率遥感影像(如Landsat影像),采用参数标定方法,对光能利用率模型(如MODIS GPP/NPP算法)的参数进行标定。然后利用标定后的模型获得高分辨率的GPP和NPP数据,将高分辨率的GPP/NPP数据尺度上推到卫星像元尺度(例如1 km),进而对遥感估算的GPP/NPP产品进行评估,分析误差来源,改进遥感GPP/NPP产品,最后获取区域尺度上精度更高的GPP/NPP产品。基于超光谱数据还可以提取对植被光合作用相当敏感的叶绿素荧光信息,其强度可以直接用来评价陆地植被GPP。上述技术已经成为一个不容忽视的前沿性科技领域,2016年12月中国成为继日本、美国之后第3个成功发射CO₂监测卫星(TanSat)的国家,对深入理解全球碳循环过程及其对气候变化的影响,提升中国在国际气候变化的话语权和主动权具有重要意义。

2.4 岩溶地区碳循环模拟

为了进一步认识岩溶地区碳循环的机理,需要对传统的碳循环模型(如Biome-BGC)进行改进,使其可以模拟岩溶地区的碳循环过程。碳循环模型主要模拟碳、氮、水分在植被-土壤-大气之间的交换过程。该模型包含植被的光合、呼吸、光合产物分配、蒸腾、截流、凋落、凋落物和微生物的分解等过程。模型输入文件主要有气象资料文件(包括了温度、辐射、降雨等驱动数据);植被参数文件(包括了植被的物候参数、光合途径、根叶比、比叶面积、各组织的碳氮比、各组织间的分配比例、冠层截流系数、最大气孔导度、叶片表面导度、边界层导度等);模型配置文件(包括模型模拟的配置信息和模拟站点的参数,如土壤深度、土壤质地、氮沉降速率等)。在岩溶地区,驱动数据输入是要充分考虑大量裂隙导致降水大量渗漏到地下河,导致支撑植物生长的有效降水十分有限,模型输入的降水应该是这部分有效降水。另外就是岩溶地区的地面破碎度高,空间异质性大,很难获取高精度的模型参数。可以以集合卡尔曼滤波和不确定性理论为基础,集成多源遥感产品,优化模型参数,提高数值模型对碳循环过程的模拟精度。

参考文献(References)

- 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 2011. 光合有效辐射(PAR)估算的研究进展 [J]. 地理科学进展, 30(9): 1125-1134. [Dong T F, Meng J H, Wu B F, et al. 2011. Overview on the estimation of photosynthetically active radiation. Progress in Geography, 30(9): 1125-1134.]
- 方精云, 朱江玲, 王少鹏, 等. 2011. 全球变暖、碳排放及不确定性 [J]. 中国科学(地球科学), 41(10): 1385-1395. [Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. 2011. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. Science China (Earth Sciences), 41(10): 1385-1395.]
- 李新, 摆玉龙. 2010. 顺序数据同化的 Bayes 滤波框架 [J]. 地球科学进展, 25(5): 515-522. [Li X, Bai Y L. 2010. A Bayesian filter framework for sequential data assimilation. Advances in Earth Science, 25(5): 515-522.]
- 刘再华. 2001. 一种特殊的碳酸盐沉积及其环境意义: “贵州乌江渡水电站灌浆帷幕老化问题的研究”中的发现 [J]. 地学前缘, 8(1): 197-201. [Liu Z H. 2001. A special kind of carbonate deposit and its environmental significance-findings from the study "on the aging of cement-grouting curtains at Wujiangdu hydropower station of Guizhou". Earth Science Frontiers, 8(1): 197-201.]
- 刘再华. 2012. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望 [J]. 科学通报, 57(2): 95-102. [Liu Z H. 2012. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks. Chinese Science Bulletin, 57(2): 95-102.]
- 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 2014. 喀斯特洞穴系统碳循环的烟囱效应研究现状及展望 [J]. 地球科学进展, 29(12): 1333-1340. [Luo W J, Wang S J, Liu X M. 2014. Research progresses and prospect of chimney effect about carbon cycle in the karst cave system. Advances in Earth Science, 29(12): 1333-1340.]
- 裴建国, 章程, 张强, 等. 2012. 典型岩溶水系统碳汇通量估算 [J]. 岩矿测试, 31(5): 884-888. [Pei J G, Zhang C, Zhang Q, et al. 2012. Flux estimation of carbon sink in typical karst water systems. Rock and Mineral Analysis, 31(5): 884-888.]
- 蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 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. [Pu J B, Jiang Z C, Yuan D X, et al. 2015. Some opinions on rock-weathering-related carbon sinks from the IPCC fifth assessment report. Advances in Earth Science, 30(10): 1081-1090.]
- 任扬帆, 马明国, 张霞, 等. 2016. 典型喀斯特石漠化地区植被动态监测与土地利用变化的影响分析 [J]. 中国岩溶, 35(5): 550-556. [Ren Y H, Ma M G, Zhang X, et al. 2016. Dynamic monitoring of vegetation and the impact of land

- use/cover change in the topical karst rocky desertification areas. *Carsologica Sinica*, 35(5): 550-556.]
- 王世杰, 刘再华, 倪健, 等. 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. [Wang S J, Liu Z H, Ni J, et al. 2017. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China. *Earth and Environment*, 45(1): 2-9.]
- 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 2018. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述 [J]. *生态学报*, 38(1): 41-54. [Xie X Y, Li A N, Jin H A. 2018. The simulation models of the forest carbon cycle on a large scale: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 38(1): 41-54.]
- 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 2005. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究 [J]. *应用生态学报*, 16(12): 2279-2283. [Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. 2005. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(12): 2279-2283.]
- 袁道先. 1999. “岩溶作用与碳循环”研究进展 [J]. *地球科学进展*, 14(5): 425-432. [Yuan D X. 1999. Progress in the study on karst processes and carbon cycle. *Advance in Earth Sciences*, 14(5): 425-432.]
- 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 2016. 现代岩溶学 [M]. 北京: 科学出版社. [Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C, et al. 2016. *Modern Karstology*. Beijing, China: Science Press.]
- 赵茂盛, Neilson R P, 延晓冬, 等. 2002. 气候变化对中国植被可能影响的模拟 [J]. *地理学报*, 57(1): 28-38. [Zhao M S, Neilson R P, Yan X D, et al. 2002. Modelling the vegetation of China under changing climate. *Acta Geographica Sinica*, 57(1): 28-38.]
- Bourges F, Genthon P, Genty D, et al. 2012. Comment on "Carbon uptake by karsts in the Houzhai basin, southwest China" by Junhua Yan et al. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 117, G03006. doi: 10.1029/2012JG001937.
- Braswell B H, Sacks W J, Linder E, et al. 2005. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations [J]. *Global Change Biology*, 11: 335-355.
- Cao J H, Yuan D X, Groves C, et al. 2012. Carbon fluxes and sinks: The consumption of atmospheric and soil CO₂ by carbonate rock dissolution [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(4): 963-972.
- Chen W, Chen J, Cihlar J. 2000. An integrated terrestrial ecosystem carbon-budget model based on changes in disturbance, climate, and atmospheric chemistry [J]. *Ecological Modelling*, 135(1): 55-79.
- Christopher J K, Carol C B, Mustapha E M, et al. 2006. A multiyear evaluation of a dynamic global vegetation model at three AmeriFlux forest sites: Vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange [J]. *Ecological Modelling*, 196(1-2): 1-31.
- Du WY, Liu Q, Jiang Y, et al. 2014. Response of carbon sink dynamic behaviors to river flood in karst area: A case study in the Li River of Guilin [J]. *Advanced Research on Material Engineering, Chemistry, Bioinformatics III*, 830: 353-362.
- Ferlan M, Alberti G, Eler K, et al. 2011. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 140(1-2): 199-207.
- Florea L J. 2013. Isotopes of carbon in a karst aquifer of the Cumberland plateau of Kentucky, USA [J]. *Acta Carsologica*, 42(2-3): 277-289.
- Frolking S E, Bubier J L, Moore T R, et al. 1998. Relationship between ecosystem productivity and photosynthetically active radiation for northern peatlands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(1): 115-126.
- Gamon J A, Huemmrich K F, Peddle D R, et al. 2004. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned [J]. *Remote Sensing of Environment*, 89(1): 139-162.
- Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of the accuracy [J]. *Global Change Biology*, 2(3): 169-182.
- Hagedorn B, Cartwright I. 2009. Climatic and lithologic controls on the temporal and spatial variability of CO₂ consumption via chemical weathering: An example from the Australian Victorian [J]. *Chemical Geology*, 260: 234-253.
- Hanan N P, Berry J A, Verma S B, et al. 2005. Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tall-grass prairie and wheat ecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131(3-4): 162-179.
- He M Z, Zhou Y L, Liu G H, et al. 2010. Validation of MODIS gross primary productivity for a subtropical coniferous plantation in southern China [C]. 18th International Conference on Geoinformatics. Beijing, China: 1689-1693.
- Hilker T, Coops N C, Wulder M A, et al. 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements [J]. *Science of the Total Environment*, 404(2): 411-423.
- Hui D, Luo Y, Katul G. 2003. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange between climatic variability and functional change [J]. *Tree Physiology*, 23: 433-442.
- Inglisma I, Alberti G, Bertolini T, et al. 2010. Precipitation puls-

- es enhance respiration of, Mediterranean ecosystems: The balance between organic and inorganic components of increased soil CO₂ efflux [J]. *Global Change Biology*, 15(5): 1289-1301.
- Ji J. 1995. A Climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *Journal of Biogeography*, 22(2/3): 445-451.
- Jiang Z C, Yuan D X. 1999. CO₂ source-sink in karst processes in karst areas of China [J]. *Episodes*, 22(1): 33-35.
- Ju W M, Chen J M, Harvey D, et al. 2007. Future carbon balance of China forests under climate change and increasing CO₂ [J]. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 538-562.
- Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water Balance, carbon balance and vegetation structure [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3): 795-825.
- Li A N, Bian J H, Lei G B, et al. 2012. Estimating the maximal light use efficiency for different vegetation through the CASA model combined with time-series remote sensing data and ground measurements [J]. *Remote Sensing*, 4(12): 3857-3876.
- Li X. 2014. Characterization, controlling, and reduction of uncertainties in the modeling and observation of land-surface systems [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(1): 80-87.
- Liu Z H, Dreybrodt W. 2015. Significance of the carbon sink produced by H₂O-carbonate-CO₂-aquatic phototroph interaction on land [J]. *Science Bulletin*, 60(2): 182-191.
- Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. 2010. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 99(3): 162-172.
- Liu Z H, Groves C, Yuan D X, et al. 2004. South China karst aquifer storm-scale hydrogeochemistry [J]. *Ground Water*, 42(4): 491-499.
- Liu Z H, Li Q, Sun H, et al. 2006. Diurnal variations of hydrochemistry in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Yunnan, SW China [J]. *Aquatic Geochemistry*, 12(2): 103-121.
- Marcolla B, Cescatti A, Manca G, et al. 2011. Climatic controls and ecosystem responses drive the inter-annual variability of the net ecosystem exchange of an alpine meadow [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9): 1233-1243.
- Mcculley R L, Burke I, Nelson J, et al. 2005. Regional patterns in carbon cycling across the great plains of North America [J]. *Ecosystems*, 8(1): 106-121.
- Medvigy D, Wofsy S C, Munger J W, et al. 2009. Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: Ecosystem demography model version 2 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 114: G01002. doi: 10.1029/2008JG000812.
- Melnikov N B, O'Neill B C. 2006. Learning about the carbon cycle from global budget data [J]. *Geophysical Research Letters*, 33, L02705. doi: 10.1029/2005gl023935.
- Molina J A E, Crocker G J, Grace P R, et al. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the NCSOIL and NCSWAP models [J]. *Geofisica Internacional*, 81(S1-S2): 91-107.
- Neilson R P, Marks D. 2010. A global perspective of regional vegetation and hydrologic sensitivities from climatic change [J]. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 715-730.
- Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 7(4): 485-809.
- Peng C H. 2000. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modeling vegetation dynamics [J]. *Ecological Modelling*, 135: 33-54.
- Philippe G. 2002. Role of karstic dissolution in global carbon cycle [J]. *Global and Planetary Change*, 33(1): 177-184.
- Piao S, Fang J, Ciais P, et al. 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 458: 1009-1013.
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 811-841.
- Ramnarine R, Wagnerriddle C, Dunfield K E, et al. 2012. Contributions of carbonates to soil CO₂ emissions [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 92: 599-608.
- Richardson A D, Hollinger D Y, Aber J D, et al. 2007. Environmental variation is directly responsible for short but not longterm variation in forest atmosphere carbon exchange [J]. *Global Change Biology*, 13(4): 788-803.
- Running S W, Hunt E R J. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models [M]// Ehleringer J R, Field C B. *Scaling physiological processes: Leaf to globe*. San Diego, USA: Academic Press: 141-158.
- Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [M]// Sala O E, Jackson R B, Mooney H A. *Methods in ecosystem science*. New York, USA: Springer-Verlag: 44-57.

- Sellers P J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 6 (8): 1335-1372.
- Sherwin C M, Baldini J U L. 2011. Cave air and hydrological controls on prior calcite precipitation and stalagmite growth rates: Implications for palaeoclimate reconstructions using speleothems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(14): 3915-3929.
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamic, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. *Global Change Biology*, 9: 161-185.
- Smith B, Prentice I C, Sykes M T. 2001. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: Comparing two contrasting approaches within European climate space [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 10(6): 621-637.
- Stéphanie Schmid, Zierl B, Bugmann H. 2006. Analyzing the carbon dynamics of central European forests: Comparison of Biome-BGC simulations with measurements [J]. *Regional Environmental Change*, 6(4): 167-180.
- Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, et al. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 23: GB2023. doi:10.1029/2008GB003327.
- Thornton P E, Law B E, Gholz H L, et al. 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 185-222.
- Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. *Nature Sustainability*, 1: 44-50.
- Van Laake P E, Sanchez-Azofeifa G A. 2005. Mapping PAR using MODIS atmosphere products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 94(4): 554-563.
- Wang P, Xie D, Zhou Y, et al. 2014. Estimation of net primary productivity using a process-based model in Gansu Province, Northwest China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 71(2): 647-658.
- Wang X F, Ma M G, Li X, et al. 2013. Validation of MODIS GPP product at ten flux sites in northern China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2): 587-599.
- Wang Y, Trudinger C M, Enting I G. 2009. A review of applications of model-data fusion to studies of terrestrial carbon fluxes at different scales [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 829-842.
- Wu W X, Wang S Q, Xiao X M. 2008. Modeling gross primary production of a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China, using MODIS imagery and climate data [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(10): 1501-1512.
- Xiao J F, Ollinger S V, Frolking S, et al. 2014. Data-driven diagnostics of terrestrial carbon dynamics over North America [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197: 142-157.
- Xu T, White L, Hui D, et al. 2006. Probabilistic inversion of a terrestrial ecosystem model: Analysis of uncertainty in parameter estimation and model prediction [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB2007. doi: 10.1029/2005gb002468.
- Xu X F, Tian H Q, Zhang C, et al. 2010. Attribution of spatial and temporal variations in terrestrial methane flux over North America [J]. *Biogeosciences*, 7(4): 3637-3655.
- Yamanaka M. 2012. Contributions of C3/C4 organic materials and carbonate rock to dissolved inorganic carbon in a karst groundwater system on Miyakojima Island, southwestern Japan [J]. *Journal of Hydrology*, 412: 151-169.
- Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, et al. 2011. Carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, Southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G04012): 1-10. doi: 10.1029/2011JG001686.
- Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, et al. 2012. Reply to comment by francois bourges et al. on "carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, Southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G03007): 102. doi: 10.1029/2012JG002060.
- Yang H, Ma M G, Flower R J, et al. 2017. Preserve Precambrian fossil heritage from mining [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 1(8): 1048-1049.
- Yang R, Liu Z H, Zeng C, et al. 2012. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China [J]. *Journal of Hydrology*, 468: 151-158.
- Yuan D X. 1997. The carbon cycle in karst [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie NF (Annual of Geomorphology)*, 108 (S1): 91-102.
- Yuan D X, Zhang C. 2002. Karst processes and the carbon cycle: Final report of IGCP379 [M]. Beijing, China: Geological Publishing House.
- Yuan Q Z, Wang S D, Dai E F, et al. 2014. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(1): 3-17.
- Zhang C. 2011. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56: 3759-3765.
- Zhang C, Yuan D, Cao J. 2005. Analysis on the environmental sensitivities of typical dynamic epikarst system at the Non-

- gla monitoring site, Guangxi, China [J]. *Environmental Geology*, 47: 615-619.
- Zhang L, Sun R, Qiao C, et al. 2014. Variation of CO₂ flux and its response to environmental factors in a maize agroecosystem in Zhangye irrigation area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 33(7): 1722-1728.
- Zhang Y Q, Yu Q, Jiang J, et al. 2008. Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 14: 757-767.
- Zhao M, Zeng C, Liu Z, et al. 2010. Effect of different land use/land cover on karst hydrogeochemistry: A paired catchment study of Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou, SW China [J]. *Journal of Hydrology*, 388: 121-130.

Research progress and prospect of observation and simulation of carbon cycle in the karst areas of Southwest China

MA Mingguo^{1,2}, TANG Xuguang^{1,2}, HAN Xujun^{1,2}, SHI Weiyu^{1,2},
SONG Lisheng^{1,2}, HUANG Jing^{1,2}

(1. Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Nature Resources, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Carbon cycle in karst regions is characterized by a double-layer structure of surface and underground spaces, organic-inorganic coupling, and biological and abiotic process interactions. It is more unique and complex relative to other terrestrial ecosystems. Southwest China is the biggest region of continuous karst landform in the world. The paths and processes of carbon cycle in this region are basically clear based on former research results. However, the carbon flux and transformation mechanisms of the rock, soil, vegetation, atmosphere, and water interfaces are still unclear. It is urgent to perform precision observation of the different components on the scale of small watershed and remote sensing estimation and model simulation on the regional scale. The research progress on observations and simulations of the carbon cycle in Southwest China were summarized in details in this study, and future research emphases were proposed.

Keywords: carbon cycle; ground observation; remote sensing; process model; Southwest China