

中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估 及其生态服务功能

宋贤威^{1,2}, 高 扬^{2,3}, 温学发², 郭大立², 于贵瑞², 何念鹏², 张进忠¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
中国科学院生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 喀斯特地区的岩石风化固碳被认为是全球遗漏碳汇之一, 中国喀斯特地区的分布面积达344万 km², 目前对其岩溶碳汇缺乏精确、系统的评估, 对碳汇产生的机制仍存在争议。本文通过对喀斯特地区碳汇研究的回顾, 详细介绍了适用于喀斯特地区固碳速率的估算方法, 并对喀斯特地区的岩石风化碳汇进行再评估, 然后将地球关键带科学概念引入喀斯特生态系统, 阐述喀斯特关键带碳汇研究对生态系统服务和功能的意义。研究结果表明, 中国喀斯特地区每年因岩溶作用产生的碳汇为4.74 Tg C yr⁻¹, 未来中国需要加强岩石—土壤—水体—生物—大气复杂交互系统的基础数据收集, 以明确各界面碳通量, 对喀斯特关键带碳汇进行多尺度、多方法、全方位联合评估, 在改善喀斯特生态系统功能、科学管理区域和国家碳收支及全球变化研究等方面为政府和学者提供参考。

关键词: 喀斯特; 关键带; 碳汇; 固碳速率; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201611005

1 引言

碳循环是地球生态系统物质和能量循环的核心, 也是驱动全球气候变化的主要动力之一, 因此成为全球气候变化研究中的前沿问题, 世界气候研究计划(WCRP)、全球碳计划(GCP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)等为准确估计和评价全球碳循环做出了重要贡献, 当前更加关注区域性碳源汇、国家碳收支平衡及其对全球变化的影响^[1]。全球碳循环中未知碳汇量为2~4 Pg C yr⁻¹, 而其中并未考虑所有的土壤侵蚀和土地利用变化的源和汇^[2-3]。全球陆地生态系统净碳吸收量为1.0~2.6 Pg C yr⁻¹, 中国陆地生态系统净碳吸收量为0.19~0.26 Pg C yr⁻¹, 气候变化的反馈作用已经对中国的水资源和农业产生了一定影响, 目前急需加强区域性气候研究以明确该影响机制和程度^[4-5]。

全球喀斯特分布面积约2200万 km², 占据陆地表面积的15%, 对陆地生态系统碳吸收的影响相当显著, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次气候变化评估报告(AR5)最新公布的剩余陆地碳汇“residual land sink”为2.5 Pg C yr⁻¹, 全球岩石风化碳汇为0.11~0.608 Pg C yr⁻¹, 占剩余陆地碳汇的4.4%~24.3%, 岩溶作用在加剧岩石风化的同时强烈影响着区域生态系统环境^[6-10]。喀斯特地区碳酸、碳酸氢盐、碳酸盐的混

收稿日期: 2016-06-24; 修订日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(41571130043); 中国科学院青年创新促进会 [Foundation: The NSFC-RCUK_NERC Major International Joint Research Project, No.41571130043; Youth Innovation Promotion Association, CAS]

作者简介: 宋贤威(1993-), 男, 硕士, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: sxwkerry@163.com

通讯作者: 高扬(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生态水文与环境地球化学耦合研究。E-mail: gaoyang@igsnr.ac.cn
1926-1938 页

合(CO_3^{2-} - CO_2 - H_2O 系统)使水中溶解性无机碳(DIC)浓度一定条件下达到1231 $\mu\text{mol/L}$,是同样条件下 CO_2 - H_2O 系统DIC浓度的66倍^[11]。故水中DIC成为评估岩石风化碳汇的重要参数,被纳入大气 CO_2 移除方法之一,且喀斯特地区碳循环与 CO_3^{2-} - CO_2 - H_2O 系统的耦联构成了岩溶动力系统^[12-13]。而另一些研究发现,碳酸盐岩的溶解并不能稳定吸收大气 CO_2 ,水中 CO_2 的再沉积可能意味着碳酸盐岩风化不会产生净的大气 CO_2 汇^[14-15]。

地球科学中“关键带”(Critical Zone)研究与生态学中“生态系统”的概念具有显著的一致性,地球关键带是指异质的近地表环境,岩石—土壤—水—生物—大气在其中发生着复杂的相互作用,也是与人类联系最为密切的地球圈层,决定着社会发展所需的资源供应^[16-18]。在关键带视角下,纵向上由地表植物冠层向下至地下含水层基岩,更加完整的表述了人类社会发展所在的资源环境带。生态系统研究发现,陆地生态系统的土壤碳循环与水循环、养分循环有着密切的耦合关系,生态恢复和土地利用方式的改变可增强喀斯特地区的碳汇^[19-22]。本文通过对喀斯特地区碳汇的研究的回顾,整理和分析了主流评估方法及成果,并在前人研究基础上对喀斯特岩溶碳汇进行再评估,最后在关键带科学概念下,对喀斯特地区的碳汇和生态服务功能进行分析和展望。

2 喀斯特关键带地理分布特征

全球喀斯特区域主要分布在东亚、地中海沿岸、北美及加勒比等地区,其中东亚片区在世界三大喀斯特集中分布区中发育最为成熟^[23]。中国喀斯特分布面积达344万 km^2 ,超过中国总陆地面积的1/3,其中裸露的碳酸盐岩面积约90.7万 km^2 ,约占中国总陆地面积的1/7,以贵州为中心的滇黔桂等8省区,也是全球最大的喀斯特集中分布区之一^[24]。

喀斯特石漠化带来的生态环境效应主要表现为水土流失、河道淤积和自然灾害频发等,同时石漠化使土地生产力减弱,严重影响农、林、牧业生产,甚至威胁到人类生存^[25]。中国典型喀斯特区域土壤平均厚度仅为30~50 cm,远低于华北平原(> 200 cm),而对于大部分农作物来说,只有土层厚度为50~60 cm时,才能维持较高的生产力^[26-28]。喀斯特地貌主要是由于水文过程对碳酸盐岩(如石灰岩、白云岩、大理石等)的溶解作用形成的,喀斯特土壤的形成速度减缓,发育程度弱,而土壤的物质组成、理化性质和生产能力的变化正是喀斯特土壤石漠化的本质^[29]。在喀斯特地区,纬度、经度地带性的水热连续分布被地质构造和岩性差异所打破,风化层和土壤的侵蚀程度受化学和水力作用的强烈调控,出现地带性土壤与非地带性土壤交错分布,不同类型及厚度的土壤垂直镶嵌分布,形成喀斯特地表和风化壳的三维高度时空异质性;同时,在水平方向岩石露头,土壤不连续分布,以及在垂直方向土壤、岩石、植被比例各不相同^[30]。

中国喀斯特地区按地理位置可划分为东部的热带喀斯特、亚热带喀斯特和温带喀斯特,以及西部干旱区和寒冻高原区,按照岩石分布类型可分为裸露型、覆盖型和埋藏型,按石漠化强度可划分为3~6个强度等级^[31-33]。根据植被覆盖率、岩石裸露率、平均土壤厚度和植被类型等指标,李瑞玲等^[34]将喀斯特土地石漠化评价体系分为轻度、中度和强度石漠化3个等级。

3 喀斯特地区岩石风化碳汇评估

3.1 喀斯特地区固碳速率估算方法

固碳速率作为碳汇评估的重要参数,目前不同方法对其计算的差异很大,且存在相

当程度的不确定性。国内外喀斯特碳汇评估的方法可分为两大类：反演模拟法（Reverse Methodology）通过分析河流水文化学参数与岩石风化产物之间的密切关系，对确定岩石类型的小流域碳吸收具有较为精确的估算；正演模拟法（Forward Modeling）受温带流模型（Temperate Stream Model）的启发由 Amiotte-Suchet 和 Probst 修改成型，主要基于岩石风化速率和岩石类型之间的关系，并考虑了岩溶作用的首要控制因子径流的影响^[35-39]。国外学者通过大量关于岩石风化速率的研究，总结出了喀斯特地区碳吸收速率的全球经验公式：

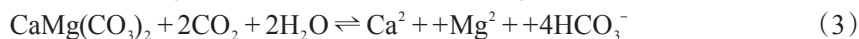
$$F_2 = a \sum_{n=1}^{12} (q_s + q_u) \quad (1)$$

式中： q_s 、 q_u 分别表示月平均地表水和地下水流量； a 表示取决于岩石类型的经验常数，其中 Bluth 等^[40]估算值 a 为 $0.0294 \text{ g C mm}^{-1}$ ，Amiotte 等^[41]估算值 a 为 $0.0383 \text{ g C mm}^{-1}$ 。应用该公式计算得出中国西南后寨河喀斯特地区固碳速率分别为 $22.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 和 $29.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ^[11]。尽管该方法在估算全球碳吸收速率中被广泛应用，但大多数估算方案中没有考虑径流的季节性变化，且现有碳吸收速率和径流以及岩石类型之间的经验常数缺乏中国喀斯特地区的数据支持。

中国喀斯特地区固碳速率的估算方法主要有：水化学径流法、溶蚀试片法、扩散边界层（DBL）理论、模型模拟法、反演模拟法等^[11, 42-43]。应用最为广泛的是水化学径流法和溶蚀试片法，在这两种方法的基础上又发展建立了潜在最大溶蚀法，多重因子综合法等估算方法^[44]。此外，监测技术和固碳速率估算方法协同发展，在生态系统、区域和全球碳汇评估中，涡度相关技术、定量遥感观测技术、激光雷达技术、稳定同位素示踪、GIS 空间分析等技术正逐渐被引入全球碳循环监测体系^[45-46]。

3.2 中国喀斯特地区岩石风化碳汇评估

3.2.1 水化学径流法原理与应用 水化学径流法适用于具有封闭边界且全排型的流域，在较宏观尺度上估算岩溶流域碳汇强度，该方法除对研究区域的条件要求较严格和水化学监测工作量大以外，还存在地球深部 CO_2 释放（如地壳变质碳和深部幔源碳）和外源酸（主要是硫酸和硝酸）等问题^[47-53]。水化学径流法主要原理是根据地表水和地下水中 HCO_3^- 浓度以及水流量估算碳酸盐岩风化导致的碳吸收速率，进而外推至区域或国家尺度估算喀斯特地区固碳速率。喀斯特地区两种主要碳酸盐矿物石灰岩和白云岩的岩溶作用对大气 CO_2 的吸收可以简化为：



虽然岩石风化消耗的 CO_2 一部分来源于土壤中 CO_2 ，并非全部直接来源于大气，但岩石风化对土壤 CO_2 的消耗将减少土壤向大气释放的 CO_2 量，对大气 CO_2 的吸收具有间接作用。两个方程式分别表示溶解 1 mol CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 需要 1 mol 或 2 mol 的 CO_2 。大气中的 CO_2 溶解在水中，系统中高浓度的 CO_2 会同时溶解地表和地下碳酸盐岩，水中溶解的碳通过水生生物吸收和土壤固定等多种形式保存。根据方程式（2）和（3）推算出岩溶作用固碳速率的简化计算公式：

$$F_1 = 0.5 \times c \times q \times \frac{M_c}{M_{\text{HCO}_3}} \quad (4)$$

式中： c 表示喀斯特区域水中的 HCO_3^- 浓度； q 表示水流量； M_c 、 M_{HCO_3} 分别表示 C 和 HCO_3^- 的相对分子质量。Yan 等^[11]使用 1986-2007 年地表水和地下水数据驱动公式（1）计算的中国喀斯特地区后寨河流域碳吸收速率为 $20.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，远高于 Jiang 等估算的中国南方喀斯特碳吸收速率 $8.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，根据中国南方喀斯特裸岩面积 44.6 万 km^2 估算

的固碳速率为 9.2 Tg C yr^{-1} , 并假定中国北方喀斯特地区碳吸收通量是南方的 $1/4$, 从而得到中国喀斯特地区裸岩区域总碳吸收通量为 12 Tg C yr^{-1} [11, 42, 54]。近年研究表明, 中国南方对全国喀斯特系统固定 CO_2 的贡献约为 $49\% \sim 81\%$, 平均 64% [9]。

3.2.2 溶蚀试片法原理与应用 溶蚀试片法由袁道先院士引入中国, 并在 IGCP-299 和 IGCP-379 项目中广泛应用 [55]。溶蚀试片法适用于上覆土壤中不含碳酸盐矿物的区域, 具有短期监测、制作简单、方法相对成熟等优点。但由于喀斯特地区空间异质性大、覆盖土壤的组成差异和不连续性、流水侵蚀方式的多样性、水—岩作用时间相对短暂等原因, 溶蚀试片法存在区域代表性和空间尺度转换问题, 直接外推至区域尺度可能造成较大偏差 [44, 56]。该方法通常以一个水文年为溶蚀时间, 根据试片重量的变化计算消耗的大气或土壤 CO_2 量并评估岩溶作用强度, 计算公式为:

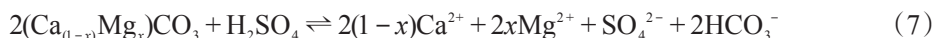
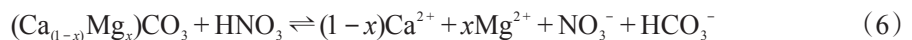
$$F = 365 \times 10^4 \times (W_1 - W_2) \times R \times \frac{M_c}{M_{\text{CaCO}_3} ST} \quad (5)$$

式中: F 为碳酸盐岩岩溶作用碳汇强度 ($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$); $W_1 - W_2$ 为埋放时间内试片绝对溶蚀量 (g); R 为试片中 CaCO_3 相对百分含量; S 为试片的表面积 (cm^2); T 为埋放时间 (d)。使用溶蚀试片法, 曾成等 [56] 估算陈旗岩溶泉区域岩溶作用碳汇强度为 $2.53 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。章程等 [57] 利用溶蚀试片法研究土下溶蚀速率时发现, 总体上溶蚀量由大到小依次为园地、林地、耕地、休耕地与灌丛。

3.2.3 中国喀斯特地区固碳速率再评估 喀斯特脆弱生态系统很大程度上是由于人类活动干扰造成的, 中国长久以来的植树造林、退耕还林和生态移民等政策试图恢复部分因植被衰落、生态系统退化和人为干扰产生的石漠化现象, 因净初级生产力 (NPP) 是绿色植物在单位时间和面积上生产的有机干物质总量, 根据不同区域 NPP, 累计后可表征地表植被固碳量 [58-60]。而全面准确评估喀斯特地区碳吸收潜力需要综合考虑土壤—大气、植被—大气等多个界面碳循环过程, 并结合多种估算方法和模型联合评估。Liu 等 [43] 结合碳酸盐岩岩溶、水循环及水生生物光合作用对 DIC 的利用估算出全球碳沉降通量为 $0.8242 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 净碳沉降通量为 $0.7052 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。Piao 等 [4] 用不同方法估算中国陆地生态系统固碳速率为 $0.19 \sim 0.26 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 其中利用大气 CO_2 浓度反演方法计算的中国陆地生态系统碳汇速率为 $0.26 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 。蒋忠诚等 [61-62] 统计的中国喀斯特面积是 346.3 万 km^2 , 其中南方岩溶区、北方岩溶区、青藏高原区和埋藏岩溶区的面积分别为 56.48 万 km^2 、 32.58 万 km^2 、 55.60 万 km^2 、 200.01 万 km^2 , 应用水化学径流法分别取 4 个分区岩溶水中平均 HCO_3^- 浓度和径流模数, 计算得出中国喀斯特地区 CO_2 汇为 $3699.1 \times 10^4 \text{ t yr}^{-1}$, 即 $10.09 \text{ Tg C yr}^{-1}$ (图 1)。而张之淦认为该计算结果存在较大偏差, 本研究根据张之淦 [15] 的分析修正了北方岩溶区和埋藏岩溶区的评估数据, 并增加了排除外源酸等干扰因子的校正系数 $\alpha = 0.65$, 对中国喀斯特地区碳吸收速率进行再评估 (表 1)。修正后中国喀斯特 CO_2 汇为 $1737.6 \times 10^4 \text{ t yr}^{-1}$, 即碳汇 $4.74 \text{ Tg C yr}^{-1}$, 和 Jiang 等 [9] 研究结果接近。

3.3 中国喀斯特地区碳汇的不确定性分析

3.3.1 外源酸对碳汇估算的干扰 喀斯特水体中的 HCO_3^- 不完全是碳酸溶蚀碳酸盐岩的结果, 硫酸和硝酸对碳酸盐岩的溶蚀产生了 HCO_3^- , 而不消耗大气或土壤中的 CO_2 , 这使水化学径流法估算的喀斯特区域固碳速率偏高。研究通过化学质量守恒和稳定同位素测定证实了硫酸参与碳酸盐岩风化的过程, 这对估算喀斯特区域固碳速率具有重要影响 [64-65]。



Yan 等 [11] 对贵州后寨河流域水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的监测发现其占总溶解性

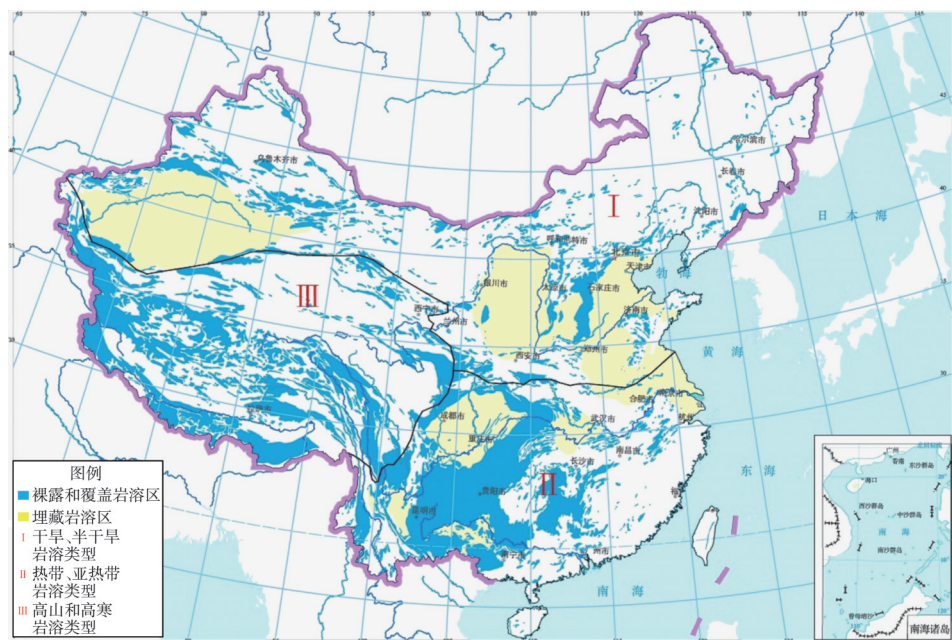


图 1 中国喀斯特类型分区图^[62]

Fig. 1 Divisions of karst types in China

表 1 中国各喀斯特分区 CO₂ 汇计算结果^[62]

Tab. 1 Estimated result of CO₂ sink in each karst region of China

岩溶类型区	面积(10 ⁴ km ²)	HCO ₃ ⁻ (g/L)	岩溶水径流模数(10 ⁷ L/(km ² yr))	校正系数	CO ₂ 汇(10 ⁴ t yr ⁻¹)
南方岩溶区	56.48	0.23	40.59	0.65	1241.5
北方岩溶区	32.58	0.25	6.31	0.65	118.1
青藏高原区	55.60	0.15	19.95	0.65	377.0
埋藏岩溶区	200.01	0.23	0.01	0.65	1.1
合计	344.67				1737.6

表 2 中国喀斯特地区固碳速率估算汇总

Tab. 2 Carbon sequestration rate of China karst CZ by different methods

估算方法	估算区域(裸岩=90.7 万 km ² , 全国=344 万 km ²)	固碳速率 (Tg C yr ⁻¹)	全球固碳速率 (Pg C yr ⁻¹)	资料来源
水化学径流法	裸岩	12	—	[11]
水化学径流法	裸岩	4.8	—	[54]
溶蚀试片法	裸岩	3.2	—	[54]
DBL 理论(潜在速率)	全国	64.2	0.41	[42]
水化学径流法	全国	17.9	0.11	[42]
溶蚀试片法	全国	17.5	0.11	[42]
溶蚀试片法	全国	3.21	—	[9]
水化学径流法	全国	4.84	—	[9]
累加法(按省份)	全国	5.07	—	[9]
GIS-溶蚀试片法	全国	3.88	—	[9]
GEM-CO ₂ 模型	全国	14.1	—	[63]
水化学径流法(分区)	全国	10.09	—	[62]
水化学径流法(分区)	全国	4.74	—	本研究

固体质量的96%, SO_4^{2-} 是占质量比例仅次于 HCO_3^- 的阴离子。水中 SO_4^{2-} 的浓度与其对岩石风化的贡献率直接相关, 刘丛强等^[53]认为中国西南地区因硫酸风化碳酸盐岩释放的 CO_2 为 $4.4 \times 10^{12} \text{ g yr}^{-1}$, 因此推算中国大陆340万 km^2 碳酸盐岩向大气释放的 CO_2 总通量为 $28 \times 10^{12} \text{ g yr}^{-1}$, 相当于每年碳酸盐岩风化消耗温室气体 CO_2 总通量的33%。张兴波等^[66]测定的青木关地下河流域因硝酸和硫酸溶蚀碳酸盐岩产生的DIC占总量的33.8%, 与刘丛强等的估算十分接近。国外学者估算大气硫酸沉降对岩石风化的贡献约为22%^[67-68]。Li等^[64]对中国雅砻江流域的研究表明, 约13%的DIC是由于硫酸参与碳酸盐岩风化所致, 并推算出流域内碳酸盐风化和硅酸盐风化消耗的大气 CO_2 量分别为 $2.8 \times 10^5 \text{ mol km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、 $0.9 \times 10^5 \text{ mol km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。沁河流域硫酸参与的碳酸盐岩风化释放的 CO_2 量为 $0.63 \times 10^5 \text{ mol km}^2 \text{ yr}^{-1}$, 高于松花江流域, 低于中国南方喀斯特流域^[69]。此外, 流域内非喀斯特区域的汇水也会对碳吸收速率的估算产生直接影响, 是当前大多数估算中没有考虑的因素之一。

3.3.2 碳酸盐再沉淀的影响 在地质时间尺度上, 碳酸盐岩风化消耗的大气 CO_2 会因碳酸盐矿物沉淀释放出等量的 CO_2 , 不能成为稳定的碳汇途径; 硅酸盐矿物风化消耗净大气 CO_2 转变为重碳酸根, 在海洋中以碳酸盐形式固定下来, 是长期的净碳汇关键因素^[35, 70]。



同时, 有研究认为水中 CO_2 相对比较稳定, 暗示岩溶地下水回到地表后水体中的 HCO_3^- 不会全部转化为 CO_2 回到大气中, 碳的有机循环会增加岩溶碳汇的速率和稳定性^[71]。如生物(水生生物和微生物等)主要以化学降解、生物物理作用和酶的作用直接或间接参与碳酸盐岩风化作用, 其中碳酸酐酶对碳酸盐岩中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的释放速度有显著增加, 可使 CO_2 在水中的溶解速率增加一个数量级^[72-73]。同时, 水生植物光合作用和生物对颗粒有机碳的吸收是产生稳定碳汇的重要原因, 水生植物光合作用生物量的88%源于水体中的DIC^[22, 74]。因此, 碳酸盐再沉淀对喀斯特地区碳汇的影响有限, 喀斯特地区碳汇可通过多种途径同时进行。

3.3.3 现存问题与展望 除岩石风化碳汇之外, 喀斯特地区碳汇还包括土壤—植被系统的有机过程和地表水系统(河流、水库和湖泊等)的生物泵过程产生的碳汇, 故未来在关键带框架中全面、系统和深入评估喀斯特碳汇可能成为研究的重点^[43]。此外, 空间尺度转换问题仍是喀斯特地区碳汇估算过程中的不确定因素之一, 合理的将监测数据联系起来, 外推到流域、区域和全国也是喀斯特碳汇研究面临的关键问题。

3.4 模型辅助估算喀斯特地区碳汇

目前陆地生态模型在过程机理、运行方式和研究对象等各方面均有很大差异, 且少有适用于喀斯特地区的模型改装和开发, 使用模型辅助估算法还面临较大的挑战和不稳定性。NCAR-CLM是美国国家大气研究中心(NCAR)开发的国际上发展较为完善的陆面过程模型, 但其应用于青藏高原陆面过程的模拟结果与观测值仍有较大偏差^[75]。中国陆地生态系统模型主要有基于碳、氮、水耦合模型AVIM2、CEVSA和GEOPRO模型; 基于不同岩石类型风化经验系数的GEM- CO_2 模型; 基于植物光合作用和自养呼吸的光能利用效率GLO-PEM、CASA和GEOLUE模型; 基于生态模式的TEM模型等^[59, 63]。周才平等用TEM模型估算整个青藏高原的净初级生产力为 $302.44 \text{ Tg C yr}^{-1}$ ^[76]。近年来, 基于稳定同位素的示踪辅助模型与传统模型的结合为评估和改进模型结构、提高模型精确度提供了新的思路。刘亚荣等^[77]利用AVIM2模拟的祁连山1958-2008年植被净初级生产力为 $127 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 且有增加的趋势, 对温度变化的响应比降水量变化更敏感。在贵州喀斯特地区特殊地形和气候条件下, 马建勇等^[78]利用AVIM2模型估算50年贵州净生态系统生产力平均值为 $23.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 不足祁连山非喀斯特区域的1/5。

在喀斯特地区碳汇研究中,邱冬生等^[63]应用GEM-CO₂模型估算出中国岩石风化碳汇为14.1 Tg C yr⁻¹,并指出碳酸盐岩和硅酸盐岩风化对碳吸收的贡献分别为52.65%和47.35%。生态系统碳模型、区域尺度反演模型和遥感观测系统的结合与相互验证将为精确评估喀斯特地区碳汇提供有力支撑,未来需要对相同机理模型进行整合和优化,增加碳循环模型在喀斯特地区的适用研究。

4 喀斯特关键带生态服务功能

在关键带科学视角下分析喀斯特生态、环境、经济问题,对解决喀斯特地区可持续发展过程中的挑战具有重要价值。如喀斯特生态系统的不可逆演化、碳—氮—水耦合循环、不同界面的交互作用和三维异质性问题,都能在关键带框架中找到新的解决启发。土壤生态系统服务是地球关键带的核心,关键带结构的稳定性和服务功能的可持续性直接影响人类福祉^[79](图2)。传统土壤学认为土壤除受地带性气候条件影响,也强烈依赖于非地带性的岩性构造和地貌、不同侵蚀类型和程度、不同覆盖植被活动和人类活动的影响,但往往局限于表层和淋溶层研究^[80]。在喀斯特关键带框架中土壤是立体空间结构,需要在风化壳、覆盖植被、基岩或沉积物以及地下水相互作用的三维结构中对研究,地上部分的生命活动显著影响土壤的生物地球化学循环,但是传统认识的土壤阻碍了对生态系统结构和功能的全面理解^[16]。

中国西南喀斯特地区岩石主要以石灰岩和白云岩为主,关键带中的网络通道概念包括岩石在自然条件下形成的裂纹和缝隙,以及石灰岩被腐蚀形成的大孔隙(竖井、漏斗),也涵盖生物维管通道。喀斯特地区植被与岩石在长期地质时期演化中达到相对稳定的平衡状态。物质和能量通过网络通道流动,在植物—大气界面过程中,形成光合作用—气孔行为—蒸腾作用之间的相互作用和反馈机制,气孔主导的光合—蒸腾作用的平衡关系对土壤有效水分十分敏感^[81]。土壤—植物根系界面,是植物获取养分和水分主要通道,根际微生物依赖根际分泌物等获取碳源,同时分解有机质供植物吸收利用。土壤的孔隙系统、微生物系统和植物根茎叶维管系统相互作用形成的连续的水分和养分运输通道相当程度上决定着关键带物理结构和生物功能的匹配。因此,网络通道的认识对恢复喀斯特脆弱生态系统功能具有一定价值。

喀斯特植被类型顺向演替系列为裸岩及稀疏草丛→草丛→草灌丛→灌木丛→灌乔→常绿落叶阔叶混交林→顶级群落,由于物种本身繁殖策略、土壤生态因子、气候因子、群落内部环境和干扰等条件不同,群落演替的途径可能更为复杂,或人工恢复条件下产生跳跃式演替^[82-83]。而人为干扰下生态系统退化将导致生态群落逆向演替^[84]。章程发现不同土地利用下的土下溶蚀速率存在显著差异,原始林地下岩溶作用碳汇量是次生林地的3倍,灌丛的9倍,从耕地或灌丛演化到次生林地,岩溶作用产生的碳汇可提高5.71~7.02 g C m⁻² yr⁻¹,若演化到原始林地碳汇可提高24.86~26.17 g C m⁻² yr⁻¹,植被的正向演替对岩溶碳汇有显著的促进作用^[7]。

植物净初级生产力(NPP)是衡量生态系统服务功能和植被活性的核心指标;土壤

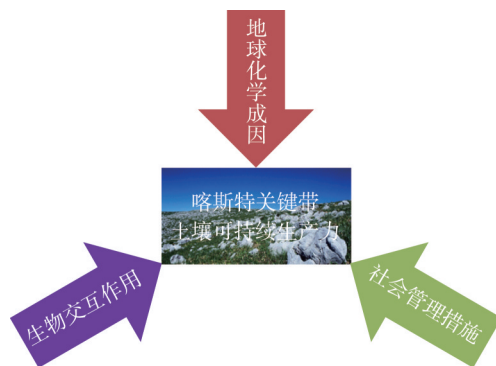


图2 喀斯特关键带核心土壤生态系统

Fig. 2 Karst CZ core: Soil ecosystem

呼吸表征植物和微生物生理活动的代谢强度;生态系统碳循环表征生物与非生物系统的紧密联系^[85-86]。Gao等提出生态系统碳—氮—水循环的平衡关系决定了土壤生态系统碳储存的阈值与平衡,深入了解生态系统碳—氮—水耦合关系对理解喀斯特关键带碳动态平衡及其临界阈值、科学管理和制定“减排增汇”决策具有重要的意义^[21, 58]。根据生态系统碳质量平衡理论,如果生态系统吸收的碳过量或不足,将造成生态系统碳循环的过程紊乱和反馈调节,生态系统水分利用效率(WUE)、氮素利用效率(NUE)趋于稳定常数,因此过多的碳将通过土壤侵蚀或其他过程流失^[20]。中国石漠化最严重的贵州省石漠化面积占全省总面积的29%,贫困人口910万,占全省总人口的1/4和全国贫困人口的1/7,形成了“生态脆弱—贫困—掠夺式开发—环境退化—进一步贫困”的恶性循环^[87]。中国西南喀斯特地区石漠化与贫困问题交织,高强度的人为干扰造成严重的土壤退化和流失,基于喀斯特关键带的碳汇研究定能为恢复该地区生态系统服务和功能做出重要贡献。

5 喀斯特关键带碳汇研究展望

喀斯特是困扰地质学、水文学、土壤学、生态学和环境科学等众多领域科研工作者的全球性问题,喀斯特关键带的研究不仅需要打破学科界限,更需要寻求国际合作,对其进行全面、深入、持续的跨学科研究。2015年新启动的中国国家自然科学基金委员会(NSFC)的中英国际合作重大项目将喀斯特地区作为研究的重要区域,重点研究喀斯特关键带的不可逆演化、碳—氮—水耦合循环、不同界面的交互作用和三维异质性等问题,以关键带的综合研究视角分析喀斯特生态环境经济问题,解决区域可持续发展过程中的挑战,极大地促进了国际交流与合作,为喀斯特关键带的研究提供了有力的支撑平台。目前,喀斯特关键带碳汇尚未准确定量评估,其生态服务于功能研究受到限制。喀斯特关键带在岩石—土壤—生物—水—大气连续体层面有更为错综复杂的相互作用关系,未来在关键带研究框架下,利用ChinaFLUX数据—模型融合系统、陆地生态系统相关模型、涡度相关观测技术和遥感观测等多种技术手段联合对喀斯特关键带碳汇进行多尺度监测与计算,多种方法对比分析,将成为碳汇评估的重要发展方向。喀斯特关键带碳汇研究作为喀斯特地区的前沿和创新问题,需要更多科学家们共同探讨。

参考文献(References)

- [1] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333 (6045): 988-993.
- [2] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [3] Fang Huajun, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon in cropland landscape. *Progress in Geography*, 2004, 23(2): 77-87. [方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 77-87.]
- [4] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1082.
- [5] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*. 2010, 467(7311): 43-51.
- [6] Xiong Kangning, Zhou Wenlong, Long Jian, et al. Spatial-temporal dynamic features and tendency of the topsoil organic carbon in integrated rehabilitating karst rocky desert. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 383-390. [熊康宁, 周文龙, 龙健, 等. 喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳时空动态特征与趋势探讨. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 383-390.]
- [7] Zhang Cheng. Carbonate rock dissolution rates in different land uses and their carbon sink effect. *Chinese Science*

- Bulletin, 2011, 56(26): 2174-2180. [章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应. 科学通报, 2011, 56(26): 2174-2180.]
- [8] Cao Jianhua, Pan Genxing, Yuan Daoxian, et al. Seasonal changes of dissolved organic carbon in soil: its environmental implication in karst area. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 224-229. [曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应. 生态环境, 2005, 14(2): 224-229.]
- [9] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Carbon cycle in the epikarst systems and its ecological effects in South China. Environmental Earth Sciences. 2013, 68(1): 151-158.
- [10] Yuan Daoxian. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 19-25. [袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.]
- [11] Yan J, Wang Y P, Zhou G, et al. Carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, Southwest China. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(G4).
- [12] Yuan Daoxian, Zhang Cheng. Karst dynamics theory in China and its practice. Acta Geoscientia Sinica, 2008, 29(3): 355-365. [袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.]
- [13] Pu Junbing, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, et al. Some opinions on rock-weathering-related carbon sinks from the IPCC Fifth Assessment Report. Advances in Earth Science, 2015, 30(10): 1081-1090. [蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 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. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1081-1090.]
- [14] Liu Zaihua. Is pedogenic carbonate an important atmospheric CO₂ sink? Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2209-2211. [刘再华. 土壤碳酸盐是一个重要的大气CO₂汇吗? 科学通报, 2011, 56(26): 2209-2211.]
- [15] Zhang Z G. Discussion on article "Calculation of atmospheric CO₂ sink formed in karst processes of karst-divided regions in China". Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 339-344. [张之淦. 对《中国岩溶作用产生的大气CO₂碳汇的分区计算》一文的商榷. 中国岩溶, 2012, 31(3): 339-344.]
- [16] Richter D D, Billings S A. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone. New Phytologist, 2015, 206(3): 900-912.
- [17] Yang Jiangfeng, Zhang Cuiguang. Earth's critical zone: A holistic framework for geo- environmental researches. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(3): 98-104. [杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 98-104.]
- [18] Yuan Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 98-100. [袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.]
- [19] Yu Guirui, Gao Yang, Wang Qiufeng, et al. Discussion on the key processes of carbon-nitrogen-water coupling cycles and biological regulation mechanisms in terrestrial ecosystem. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 1-13. [于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 等. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13.]
- [20] Gao Y, Yu G R, He N P, et al. Is there an existing healthy threshold for carbon storage in the ecosystem? Environmental Science & Technology, 2012, 46(9): 4687-4688.
- [21] Gao Y, Yu G R, He N P. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles: Advocating a health threshold for carbon storage. Ecological Engineering, 2013, 57: 366-374.
- [22] Jiang Zhongcheng, Qin Xiaoqun, Cao Jianhua, et al. Significance and carbon sink effects of karst processes in global carbon cycle: Also reply to "Discussion on article 'Calculation of atmospheric CO₂ sink formed in karst processes of karst-divided regions in China' ". Carsologica Sinica, 2013, 32(1): 1-6. [蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 等. 论岩溶作用对全球碳循环的意义与碳汇效应—兼对《对〈中国岩溶作用产生的大气CO₂碳汇分区估算〉一文的商榷》的答复. 中国岩溶, 2013, 32(1): 1-6.]
- [23] Dürr H H, Meybeck M, Dürr S H. Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(4): 49-53.
- [24] Luo Weijun, Wang Shijie, Liu Xiuming. Research progresses and prospect of chimney effect about carbon cycle in the karst cave system. Advances in Earth Science, 2014, 29(12): 1333-1340. [罗维均, 王世杰, 刘秀明. 喀斯特洞穴系统碳循环的烟囱效应研究现状及展望. 地球科学进展, 2014, 29(12): 1333-1340.]
- [25] Huang Qiuhao, Cai Yunlong, Wang Xiuchun. Progress of research on rocky desertification in karst areas of southwestern China. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(2): 106-111. [黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 106-111.]
- [26] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, et al. Formation and evolution of karst weathering crust on limestone and its cycle

- significance. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(3): 17-22. [李德文, 崔之久, 刘耕年, 等. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义. *中国岩溶*, 2001, 20(3): 17-22.]
- [27] Xiang Yan, Gong Daozhi, Mei Xurong, et al. Genotype difference of soil water dynamics and yield of winter wheat under different water supply conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 74-79. [项艳, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 华北平原不同灌水条件下两冬麦品种土壤水分动态与产量差异. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 74-79.]
- [28] Li Ao, Duan Xingwu. Productivity assessment for black soil region in northeastern China using black soil thickness: A case study of Hebei watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1): 154-159. [李骛, 段兴武. 利用黑土层厚度评价东北黑土区土壤生产力: 以鹤北小流域为例. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 154-159.]
- [29] Long Jian, Jiang Xinrong, Deng Qiqiong, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou province. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 419-427. [龙健, 江新荣, 邓启琼, 等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. *土壤学报*, 2005, 42(3): 419-427.]
- [30] Di Xinyue, An Xianjin, Dong Hui, et al. The distribution and evolution of soil organic matter in the karst region, Guizhou province, southwestern China. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 697-708. [邸欣月, 安显金, 董慧, 等. 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征. *地球与环境*, 2015, 43(6): 697-708.]
- [31] Bai Xiaoyong, Wang Shijie, Chen Qiwei, et al. Spatio-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou province. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 609-618. [白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价. *地理学报*, 2009, 64(5): 609-618.]
- [32] Wang Delu, Zhu Shouqian, Huang Baolong. Preliminary study on types and quantitative assessment of karst rocky desertification in Guizhou Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1057-1063. [王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 贵州喀斯特石漠化类型及程度评价. *生态学报*, 2005, 25(5): 1057-1063.]
- [33] Peng Jian, Cai Yunlong, Wang Xiuchun, et al. Assessment on land use/cover change in karst areas based on landscape ecology: A case study at Maotiaohe river basin, Guizhou, Chin. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(2): 137-143. [彭建, 蔡运龙, 王秀春. 基于景观生态学的喀斯特生态脆弱区土地利用/覆被变化评价: 以贵州猫跳河流域为例. *中国岩溶*, 2007, 26(2): 137-143.]
- [34] Li Ruiling, Wang Shijie, Xiong Kangning, et al. A study on rocky desertification evaluation index system: A case study of Guizhou province. *Tropical Geography*, 2004, 24(2): 145-149. [李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨: 以贵州省为例. *热带地理*, 2004, 24(2): 145-149.]
- [35] Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 1999, 159(1-4): 3-30.
- [36] Velbel M A, Price J R. Solute geochemical mass-balances and mineral weathering rates in small watersheds: Methodology, recent advances, and future directions. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(8): 1682-1700.
- [37] Meybeck M. Global chemical-weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401-428.
- [38] Suchet P A, Probst J L. A global-model for present-day atmospheric soil CO₂ consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO₂). *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 1995, 47(1/2): 273-280.
- [39] Hartmann J. Bicarbonate- fluxes and CO₂- consumption by chemical weathering on the Japanese Archipelago: Application of a multi-lithological model framework. *Chemical Geology*, 2009, 265(3/4): 237-271.
- [40] Suchet P A, Probst J L. Modeling of atmospheric CO₂ consumption by chemical-weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 1993, 107(3/4): 205-210.
- [41] Bluth G J S, Kump L R. Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(10): 2341-2359.
- [42] Liu Z, Zhao J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. *Environmental Geology*, 2000, 39(9): 1053-1058.
- [43] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. 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. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3/4): 162-172.
- [44] Liu Zaihua. "Method of maximum potential dissolution" to calculate the intensity of karst process and the relevant carbon sink: With discussions on methods of solute load and carbonate-rock-tablet test. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 379-382. [刘再华. 岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗—平衡化学法”: 兼论水化学径流法和溶蚀试片法. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 379-382.]
- [45] Cao Mingkui, Yu Guirui, Liu Jiyan, et al. Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial

- ecosystem carbon cycle. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(Suppl. 2): 1-14. [曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2004, 34(Suppl.2): 1-14.]
- [46] Yu Guirui, Wang Qiufeng, Zhu Xianjin. Methods and uncertainties in evaluating the carbon budgets of regional terrestrial ecosystems. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 103-113. [于贵瑞, 王秋凤, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 103-113.]
- [47] Zhang Hongming, Li Shuguang. Deep carbon recycling and isotope tracing: Review and prospect. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(10): 1459-1472. [张洪铭, 李曙光. 深部碳循环及同位素示踪: 回顾与展望. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(10): 1459-1472.]
- [48] Hurwitz S, Evans W C, Lowenstern J B. River solute fluxes reflecting active hydrothermal chemical weathering of the Yellowstone Plateau Volcanic Field, USA. *Chemical Geology*, 2010, 276(3/4): 331-343.
- [49] Du J G, Cheng W Z, Zhang Y L, et al. Helium and carbon isotopic compositions of thermal springs in the earthquake zone of Sichuan, southwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(5): 533-539.
- [50] Lerman A, Wu L L, Mackenzie F T. CO_2 and H_2SO_4 consumption in weathering and material transport to the ocean, and their role in the global carbon balance. *Marine Chemistry*, 2007, 106(1/2): 326-350.
- [51] Gaillardet J, Galy A. Atmospheric science: Himalaya-carbon sink or source? *Science*, 2008, 320(5884): 1727-1728.
- [52] Li Jun, Liu Congqiang, Li Longbo, et al. The impacts of chemical weathering of carbonate rock by sulfuric acid on the cycling of dissolved inorganic carbon in Changjiang River water. *Geochimica*, 2010, 39(4): 305-313. [李军, 刘丛强, 李龙波, 等. 硫酸侵蚀碳酸盐岩对长江河水 DIC 循环的影响. *地球化学*, 2010, 39(4): 305-313.]
- [53] Liu Congqiang, Jiang Yingkui, Tao Faxiang, et al. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China. *Geochimica*, 2008, 37(4): 404-414. [刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环. *地球化学*, 2008, 37(4): 404-414.]
- [54] Jiang Z C, Yuan D X. CO_2 source-sink in karst processes in karst areas of China. *Episodes*, 1999, 22(1): 33-35.
- [55] Yuan Daoxian. Progress in the study on karst processes and carbon cycle. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(5): 425-432. [袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 425-432.]
- [56] Zeng Cheng, Zhao Min, Yang Rui, et al. Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: A case study in the Chenqi karst spring system. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(1): 106-111. [曾成, 赵敏, 杨睿, 等. 岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较: 以陈旗岩溶泉域为例. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 106-111.]
- [57] Zhang Cheng, Xie Yunqiu, Lü Yong, et al. Impact of land-use patterns upon karst processes: Taking Nongla Fengcong depression area in Guangxi as an example. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1181-1188. [章程, 谢运球, 吕勇, 等. 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. *地理学报*, 2006, 61(11): 1181-1188.]
- [58] Gao Y, Zhu X J, Yu G R, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 195: 32-37.
- [59] Zhang Yanfang, Wei Hejie. Space-time evolution of carbon flux in Shaanxi province based on the ecological balance perspective. *Arid Zone Research*, 2015, 32(4): 777-783. [张艳芳, 位贺杰. 基于生态平衡视角的陕西碳通量时空演变分析. *干旱区研究*, 2015, 32(4): 777-783.]
- [60] Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380. [陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.]
- [61] Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Cao Jianhua, et al. A study of carbon sink capacity of karst processes in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(2): 129-134. [蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 等. 中国岩溶碳汇潜力研究. *地球学报*, 2012, 33(2): 129-134.]
- [62] Jiang Zhongcheng, Qin Xiaoqun, Cao Jianhua, et al. Calculation of atmospheric CO_2 sink formed in karst progresses of the karst divided regions in China. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 363-367. [蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 等. 中国岩溶作用产生的大气 CO_2 碳汇的分区计算. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 363-367.]
- [63] Qiu Dongsheng, Zhuang Dafang, Hu Yunfeng, et al. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China. *Earth Science*, 2004, 29(2): 177-182. [邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算. *地球科学*, 2004, 29(2): 177-182.]
- [64] Li S L, Chetelat B, Yue F J, et al. Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan

- Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88: 74-84.
- [65] Li S L, Liu C Q, Lang Y C, et al. Stable carbon isotope biogeochemistry and anthropogenic impacts on karst ground water, Zunyi, Southwest China. *Aquatic Geochemistry*, 2008, 14(3): 211-221.
- [66] Zhang Xingbo, Jiang Yongjun, Qiu Shulan, et al. Agricultural activities and carbon cycling in karst areas in Southwest China: Dissolving carbonate rocks and CO₂ sink. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 466-476. [张兴波, 蒋勇军, 邱述兰, 等. 农业活动对岩溶作用碳汇的影响: 以重庆青木关地下河流域为例. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 466-476.]
- [67] Anderson S P, Drever J I, Frost C D, et al. Chemical weathering in the foreland of a retreating glacier. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. 2000, 64(7): 1173-1189.
- [68] Price J R, Rice K C, Szymanski D W. Mass-balance modeling of mineral weathering rates and CO₂ consumption in the forested, metabasaltic Hauver Branch watershed, Catocin Mountain, Maryland, USA. *Earth Surface Process and Landforms*. 2013, 38(8): 859-875.
- [69] Zhang Dong, Qin Yong, Zhao Zhiqi. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid on small basin in North China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3568-3578. [张东, 秦勇, 赵志琦. 我国北方小流域硫酸参与碳酸盐矿物化学风化过程研究. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3568-3578.]
- [70] Moon S, Chamberlain C P, Hilley G E. New estimates of silicate weathering rates and their uncertainties in global rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 134: 257-274.
- [71] Adamczyk K, Premont-Schwarz M, Pines D, et al. Real-time observation of carbonic acid formation in aqueous solution. *Science*, 2009, 326(5960): 1690-1694.
- [72] Lian Bin, Yuan Daoxian, Liu Zaihua. Effect of microbes on karstification in karst ecosystems. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2158-2161. [连宾, 袁道先, 刘再华. 岩溶生态系统中微生物对岩溶作用影响的认识. *科学通报*, 2011, 56(26): 2158-2161.]
- [73] Liu Zaihua. The role of carbonic anhydrase as an activator in carbonate rock dissolution and its significance in atmospheric CO₂ precipitation. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(5): 477-480. [刘再华. 碳酸酐酶对碳酸盐岩溶解的催化作用及其在大气CO₂沉降中的意义. *地球学报*, 2001, 22(5): 477-480.]
- [74] Montety V D, Martin J B, Cohen M J, et al. Influence of diel biogeochemical cycles on carbonate equilibrium in a karst river. *Chemical Geology*, 2011, 283(1-2SI): 31-43.
- [75] Luo Lihui, Zhang Yaonan, Zhou Jian, et al. Simulation and application of the land surface model CLM driven by WRF in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 553-564. [罗立辉, 张耀南, 周剑, 等. 基于WRF驱动的CLM模型对青藏高原地区陆面过程模拟研究. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 553-564.]
- [76] Zhou Caiping, Ou Yanghua, Wang Qinxue, et al. Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 74-79. [周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. *地理学报*, 2004, 59(1): 74-79.]
- [77] Liu Yarong, Jia Wenxiong, Huang Wen, et al. Response of vegetation net primary productivity to climate change in the Qilian Mountains since recent 51 years. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(3): 601-607. [刘亚荣, 贾文雄, 黄玫, 等. 近51年来祁连山植被净初级生产力对气候变化的响应. *西北植物学报*, 2015, 35(3): 601-607.]
- [78] Ma Jianyong, Gu Xiaoping, Huang Mei, et al. Temporal-spatial distribution of net ecosystem productivity in Guizhou during the recent 50 years. *Ecology and Environment*, 2013, 22(9): 1462-1470. [马建勇, 谷晓平, 黄玫, 等. 近50年贵州净生态系统生产力时空分布特征. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1462-1470.]
- [79] Banwart S, Menon M, Bernasconi S M, et al. Soil processes and functions across an international network of critical zone observatories: Introduction to experimental methods and initial results. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, 344(11/12): 758-772.
- [80] Lin H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 6(2): 3417-3481.
- [81] Yu Guirui, Wang Qiufeng, Fang Huajun. Fundamental scientific issues, theoretical framework and relative research methods of carbon-nitrogen-water coupling cycles in terrestrial ecosystems. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 683-698. [于贵瑞, 王秋风, 方华军. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、理论框架与研究方法. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 683-698.]
- [82] Yu Lifei, Zhu Shouqian, Ye Jingzhong, et al. Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(1): 1-7. [喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 等. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. *林业科学*, 2002, 38(1): 1-7.]
- [83] Zeng Fuping, Peng Wanxia, Song Tongqing, et al. Changes in vegetation after 22 years natural restoration in the karst

- disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5110-5119. [曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复22年后群落特征. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.]
- [84] Liu Fang, Wang Shijie, Luo Haibo, et al. Vegetation succession with karst rocky desertification and its impact on water chemistry of runoff. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 26-32. [刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响. *土壤学报*, 2006, 43(1): 26-32.]
- [85] Amundson R, Richter D D, Humphreys G S, et al. Coupling between biota and earth materials in the critical zone. *Elements*, 2007, 3(5): 327-332.
- [86] Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(31): 12942-12945.
- [87] Wang Shijie. The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China: Karst rocky desertification. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 120-126. [王世杰. 喀斯特石漠化: 中国西南最严重的生态地质环境问题. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.]

Rock-weathering-related carbon sinks and associated ecosystem service functions in the karst critical zone in China

SONG Xianwei^{1,2}, GAO Yang^{2,3}, WEN Xuefa², GUO Dali², YU Guirui²,
HE Nianpeng², ZHANG Jinzhong¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The global karst area is about $2.2 \times 10^7 \text{ km}^2$, wherein China reaches up to $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$, occupying more than one third of the global karst area. The previous studies have showed that carbon (C) sequestration rate by chemical weathering in Chinese karst zone range from 5 Tg C yr^{-1} to 18 Tg C yr^{-1} , which are considered as one of important "residual land sink" in global change research. In order to accurately estimate the C sequestration rate in karst area, we put forward the concept of Earth Critical Zone (CZ) for karst ecological system. In this study, we comprehensively understand the C cycle in karst CZ, introduce the estimation of the methods on karst CZ, and then re-evaluate the C sequestration rate in the karst CZ. At last, we systematically discuss the uncertainty of the C sinks in karst CZ. The results show that the rock-weathering-related C sink rate in Chinese karst CZ is about $4.74 \text{ Tg C yr}^{-1}$. In addition, we elaborate the significance of C sequestration to ecological system service in karst CZ, strive to to strengthen the C monitor at rock-soil-water-biological-atmosphere continuum level in the future, and then use different methods to estimate and evaluate C cycle at multi-scale in karst CZ.

Keywords: karst; critical zone; carbon sink; carbon sequestration rate; China