

# 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势

刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法

中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

Liu Congqiang, Lang Yunchao, Li Siliang, Piao Hechun, Tu Chenglong, Liu Taoze,  
Zhang Wei, Zhu Shufa

State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Liu Congqiang, Lang Yunchao, Li Siliang et al. Researches on biogeochemical processes and nutrient cycling in karstic ecological systems southwest China: A review. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 001-012

**Abstract:** Karstic geological and ecological systems are the important components of the Earth's surface system, and their changes will give impacts on other areas and even the Earth system. Biogeochemical cycling is the key subject of studies of global as well as local changes, since there is a strong linkage between change of an ecological system and biogeochemical cycling of water and nutrients. Accordingly, it is important to study the changes of karstic ecological system and its response to or impact on global change, based on a better understanding of biogeochemical cycling in a whole karstic ecological system. It is the base of further studies on plant adaptabilities and optimization of assemblage of plant species of an ecological system. Based on the previous studies, this review introduces our researches on biogeochemical processes and nutrient cycling occurring mainly at rock/soil and soil/plant interfaces in karstic ecological system by using chemical balance theory, stoichiometry and multiple isotope tracers (e. g.,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). The achieved important understandings are that the biogeochemical cycling of nutrients in karstic ecological system is active, coupled to each other and closely related to eco-environmental change, that human activities are clearly impacting natural biogeochemical cycling in catchments and result in related ecological and environmental problems, and that the studies on areal change are important for studying global change. These findings or recognitions will be the main directions leading our further studies of biogeochemical cycling nutrients in karstic and other ecological systems.

**Key words:** karstic ecological system; biogeochemical cycling; global change; areal response; ecological adaptability; research trends

**摘要:** 喀斯特地质与生态系统是地球表层系统中的重要组成部分, 其变化将对其他地区以及整个地球系统产生影响。生物地球化学循环是全球和区域变化研究的核心内容, 而生态系统的演化与系统内水分和养分的生物地球化学循环密切相关。因此, 我们有必要将喀斯特生态系统纳入到更大区域或全球生态系统中进行分析研究, 在充分研究认识整个喀斯特生态系统物质生物地球化学循环规律的基础上, 进一步研究喀斯特生态

收稿日期: 2009-11-01; 修回日期: 2009-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB403200); 国家自然科学基金项目(40721002, 90610037)

作者简介: 刘丛强(1955—), 男, 研究员, 博士生导师。主要从事生物地球化学过程和地表物质循环研究。E-mail: liucongqiang@vip.skleg.cn

系统的全球变化响应或影响机制, 为喀斯特生态系统优化调控对策和措施提供科学基础。研究生态系统演化过程中物质的生物地球化学循环规律, 是研究植物适生性、物种优化配置和适应性生态系统调控机理的关键基础。在介绍前人工作基础的同时, 本文全面而概括地总结了我国近年利用元素、同位素(如  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )示踪和化学计量学理论和方法对喀斯特生态系统中不同界面和流域中物质的生物地球化学循环及其生态环境效应的研究成果。认识到: 喀斯特流域生物地球化学循环活跃, 相互耦合, 并与流域生态环境变化相互制约; 人类活动正干预流域物质的自然生物地球化学循环过程, 并导致相应的生态和环境效应; 全球变化科学深化有赖于区域生态环境变化及物质生物地球化学循环的研究。这些认识是我们将来系统深入开展喀斯特以及其他流域生态系统物质生物地球化学循环研究的重要方向。

关键词: 喀斯特生态系统; 生物地球化学循环; 全球变化; 区域响应; 生态适应性; 研究趋势

中图分类号: P642 25; P593 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2009)06-0001-12

## 1 全球变化与喀斯特区域生态环境研究

人类当今面临的环境问题不再只是局部或区域的问题, 而是跨越国界的全球性问题。全球性环境问题就科学内容而言已经远远超过了单一学科的范围, 往往涉及大气、海洋、土壤、生物等各类环境因子, 又与物理、化学和生物过程有密切关联。全球变化科学对揭示和理解人类赖以生存的地球系统运转的机制、变化规律及人类活动对地球表层环境系统的影响具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。区域变化既可以认为是全球变化的区域表现, 又可以认为是全球变化的区域响应, 它们是地球系统内在规律调控下和人类活动影响下的具体行为, 通过地球系统的运行规律连接成为一个相互作用的整体, 任何一个地区的变化都是地球系统整体行为中的一个部分, 也对其他地区以及整个地球系统产生影响和控制<sup>[1]</sup>。

全球变化区域响应和适应的研究已经构成目前全球变化研究的核心内容<sup>[1-3]</sup>。对全球变化的适应是人类应对全球变化策略的明智选择, 应该将全球变化的适应研究提升到可持续发展能力建设的高度<sup>[4]</sup>。对全球变化区域响应和适应的研究目标主要为阐明气候变化、大气成分变化和土地利用变化对生态系统的影响, 并预测这些影响及其对物理气候系统的反馈作用。周秀骥<sup>[5]</sup>指出, 我国全球变化研究应突出区域特色, 紧密结合全球, 突出中国区域地球系统研究的特点, 并认为开展我国区域集成研究应该根据区域特点提取针对性科学问题, 认识与全球变化之间的联系。我国全球变化研究重点应充分发挥我国已有的学术优势, 针对独特的地域特征, 选择能够带动区域整体环境研究的核心科学问题, 围

绕全球变化及其区域响应, 揭示我国对全球变化的响应与影响, 剖析环境变化的自然和人文因素, 为我国典型区域在全球变化背景下的合理发展提供对策和决策依据。

喀斯特地质与生态系统是地球表层系统中的重要组成部分<sup>[6]</sup>, 中国西南喀斯特地质与生态系统在水文地质、地球化学背景、喀斯特植被以及喀斯特人类活动方面具有特殊性, 构成了脆弱的地质与生态系统, 在基础科学研究和退化生态系统的综合治理方面都具有世界代表性或范例性。喀斯特地质与生态系统由于  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$  体系活跃的生物过程和化学过程, 在全球碳循环中发挥着重要作用。岩溶学研究长期处于形态描述、分类和成因分析的过程中, 采用地球系统科学的认识和方法论来研究岩溶科学却比其他学科较晚<sup>[7-8]</sup>。近 10 多年来, 随着喀斯特地区以石漠化为主要特征的生态环境恶化日益严峻, 国内外对喀斯特地区的生态环境问题给予了高度关注, 科学家们用地球系统科学思想从全球角度研究岩溶, 形成了现代岩溶学<sup>[8]</sup>。目前的喀斯特科学研究重点和思路与以往相比发生了明显变化, 从原来的侧重地貌过程和水文过程的传统岩溶过程研究转变到喀斯特生态系统脆弱性和人类影响、喀斯特地区的生态系统退化、生态重建研究。在研究思路, 利用地球系统科学观, 将喀斯特地质与生态系统视为整体, 将喀斯特地质与生态系统作为地球系统中的子系统, 以全球变化的区域响应为科学核心, 利用地质学、地理学、地球化学、生物学等多种学科理论和手段, 对喀斯特地质与生态系统中各种地质、地球化学和生态过程以及人为活动特点及其对系统中物质的生物地球化学循环进行研究。

2006 年国家科学技术部立项的“973”项目(西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控)主要瞄准

西南喀斯特山区石漠化过程和适应性生态修复的基础理论问题,以地球系统科学论的科学思想为指导,通过多学科交叉融合,宏观和微观结合,充分运用现代地学、宏观生态学和植物学理论、“3S”技术、先进的地质地球化学实验与观测等研究手段,结合野外区域生态试验和观测台站研究,选择以贵州为中心的西南喀斯特不同生态环境区典型小流域为研究对象,以岩石-土壤-水-生物相互作用的生物地球化学过程及其对石漠化的响应为科学核心,重点深入研究喀斯特山地石漠化过程中的土壤侵蚀、水土流失和生态系统退化的生物地球化学作用,研究喀斯特环境中的生物适应对策和物种优化配置理论,建立喀斯特生态系统健康与安全评价体系,探索顺应自然规律并兼顾生态系统服务功能和区域社会发展需求的、能够有效促进生态系统修复的可行性途径,提出喀斯特退化、石漠化生态系统修复和优化调控的理论体系。地球系统科学、全球变化科学研究理论和方法在喀斯特生态环境科学研究中的逐步应用将有力推动喀斯特生态与环境科学及其相关学科的发展,为全球变化研究做出中国科学家的理论贡献。

## 2 生物地球化学循环是全球和区域变化研究的核心内容

生物圈的概念是奥地利地质学家 E. Suess 在 1875 年提出来的。根据他的定义,生物圈是指有生物存在的地表外圈。在 20 世纪初科学家们扩大这一概念,将生物圈定义为生命体生物地球化学作用能影响到的地球外壳。生物圈不只是生物的生境,而是一个全球系统,其中存在多样形式的生命及其新陈代谢活动和非生命活动的固体、液体和气体物质<sup>[9]</sup>。生命体物质与环境非生命物质的相互作用是以化学元素在生命体物质与环境之间的交换形式表现的, Vernadsky<sup>[10]</sup> 将这种实质上是受地质因素和生物作用影响的物质交换过程定义为生物地球化学过程。

地球自然演化的原动力经历了从内部能量到以太阳能为主的漫长过程,这种演变的结果导致了地表圈层元素分布和组成的改变,进而影响到整个地球的气候与生态系统<sup>[11]</sup>。物质运动具体表现为一系列复杂的物理、化学和生物过程,以太阳能为主要驱动力,在地表不断地进行着迁移、转化以及系统之

间和界面处的交换。全球环境变化是人类目前所面临的严重环境问题,这一问题在很大程度上与人类活动有关,与人为活动干预下地球系统碳、氮、磷、硫等元素的地质与生物地球化学循环的改变有关<sup>[12-13]</sup>。因此,揭示地表物质的运动规律及其与全球变化的关系,是生物地球化学循环研究的核心内容。

生物地球化学循环是生物圈的内在特征。“所有来自大自然的生命将再次回到自然中”的著名圣经格言被富有想象力的科学家们的智慧变成了化学元素的生物地球化学循环理论<sup>[9]</sup>。这些化学元素被卷入到无休止的物质交换中,在化学组成动态上维持着生命体和生物圈的主要组分:大气、土壤、陆地、水和海洋。全球、区域和地区尺度的生物地球化学循环是生物地球化学的主要研究内容。生物圈及其与各圈层之间的相互作用对地球环境变化起着巨大的推动作用:生物地球化学过程控制地球系统物质的生物地球化学循环。

生物地球化学循环是指物质在自然环境中的传输和转化过程,即物质的环境-生物-环境的循环过程。C、N、S、P、水分和其他一些有机物质的循环是所有循环物质中最为重要的。由于人类活动的干预而导致 C、N、S、P 等元素正常循环的打破,致使当今人类必须面临一系列的环境问题,如 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等温室气体在大气圈中的增加直接和间接地引起了全球气候的变化,含 P 有机物质的增加导致大面积水体表面的富营养化,而 S 和 N 氧化物的增加则又直接导致酸雨的形成。更为严重的是,这些元素组成的化合物还处在进一步增加的过程中,将会加重全球性环境问题。

地表水及其驱动的物质循环在全球陆地-海洋生物地球化学循环中的作用受到了众多科学家的极大关注。在生物地球化学循环的研究中,人们更加注重人类活动加速或改变生物地球化学循环所产生的一系列生态与环境问题,这些环境问题包括区域陆地生态系统退化、水生态系统的酸化、湖泊和近海水体的富营养化、全球变化对人类健康和生物多样性的影响等<sup>[14]</sup>。在研究生物地球化学循环与生态环境变化的关系方面,科学家们将陆地具有不同生态环境特征的小流域以及流域-河流-海湾系统作为整体,重点研究营养元素的输入、迁移、转化、循环和输出的规律及其与流域生态环境变化之间的关系。

### 3 生物地球化学过程和物质循环研究与石漠化喀斯特生态系统恢复

喀斯特地区为非地带性的脆弱生态带, 植被一旦被破坏, 土壤侵蚀作用加剧, 往往导致薄土层全部流失, 造成严重的石漠化。喀斯特石漠化现象在宏观上表现为水土流失与生态系统退化, 导致土地资源丧失和自然灾害频发; 在微观上主要表现为生态系统(岩石/土壤-植被-水-大气系统)生物地球化学循环过程的改变以及植被的难恢复性。因此, 在宏观上要求从更大范围深入研究喀斯特山区水土流失与石漠化的时空演变格局与发生发展规律, 退化生态系统修复的生态、经济和社会效益的协调统一规律; 在微观上应进一步研究喀斯特薄土层坡地的侵蚀机理和石漠化过程中植物与环境之间的竞争和协同机制, 生态系统的结构和功能变化, 系统内部各个圈层之间的物质转化、养分循环、能量流动和信息传递规律。

与其他生态环境系统一样, 喀斯特环境中物质的生物地球化学循环受地质(岩石、土壤)、地理(地形、地貌)、气候(降水)、生物(植被、土壤微生物等)、水(地表水、地下水)与大气(自然与人为输入物)的控制。因此, 喀斯特生态系统运行的基础是系统中大气-水-土壤-岩石-生物(植物-微生物)等界面物质(养分与水分)的生物地球化学循环, 其运动规模、转移方向、流通速率是决定生态系统生产力与稳定性的关键控制因素, 其耦合与脱耦合是喀斯特生态系统稳定与退化的根本原因。

养分是生态系统生命支持体系的物质基础, 构成了喀斯特生态系统生物地球化学物质循环的主要内容, 在喀斯特生态系统形成、演化和发展中具有根本的地位。水分驱动机理和养分循环特征是理解喀斯特生态系统功能, 尤其是生态系统生产力及其稳定性的关键基础。了解喀斯特生态系统演化中养分循环的生物地球化学特征及其对生态系统类型演变、生产力与生态功能的影响机制, 是认识喀斯特生态系统退化及恢复的基础和关键。植物生理生态学是研究生态因子与植物生理现象之间相互关系的科学, 它从生理机制上探讨植物与环境的关系、物质代谢和能量流动规律以及植物在不同环境条件下的适应性。由于它能在生理机制上解释许多生态环境问题, 因而日益受到人们广泛的关注<sup>[15]</sup>。喀斯特生态

系统退化过程中养分循环的变化规律是分析石漠化过程中植物群落受损和植物适应机理, 探索植被稳定性与土壤水肥等环境要素变化之间的关系所必须解决的关键问题。因此, 以典型喀斯特小流域物质在不同圈层之间循环为主线, 研究以水为纽带的区域岩石-土壤-植被-大气系统及其中的各个界面物质的生物地球化学循环在人类活动胁迫下变化规律及其生态效应, 是进行喀斯特山地水土流失防治或退化和石漠化生态系统修复科学基础。

### 4 喀斯特流域尺度养分循环与生态环境变化

喀斯特流域物质的生物地球化学循环反映了流域喀斯特生态系统和地质环境的各种特征, 反之亦然。理解这种物质的生物地球化学循环与生态环境变化之间的关系是我们掌握生态系统退化和环境恶化内在规律和对退化生态系统进行恢复、整治和重建的科学理论基础。近年来, 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室在国家“973”项目、中科院知识创新工程重要方向项目和国家自然科学基金项目的资助下, 将流域地质、生态与环境系统作为整体, 利用多学科交叉系统研究了喀斯特生态系统中地表水循环驱动的物质循环及其生态和环境效应。特别在喀斯特生态系统生物地球化学过程和物质循环规律研究方面获得初步但极为重要的认识<sup>[16]</sup>。

#### 4.1 地表水地球化学组成对流域地质和生态环境变化的响应

近年来我们以我国西南具有不同生态背景的喀斯特和非喀斯特流域物质的水文地球化学循环为研究核心, 重点开展了流域大气降水、地表水、地下水的地球化学研究, 发现地表水地球化学组成与流域地质、生态和环境存在紧密相关的相互联系。

喀斯特流域与碎屑岩流域地表水中的主要离子成分首先存在较大差别: 前者以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 而后的阳离子却以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  为主, 其阴离子成分中含有较多的  $\text{Cl}^-$ 。碎屑岩地区河水间的  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  浓度比值整体较高, 而石灰岩地区地表水的  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  值最低;  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  值在黔南喀斯特地区中值为 0.013, 而在黔东南碎屑岩地区中值为 1.63。利用 GIS 的空间分析能力对乌江流域各子流域的地质和生态环境

(岩性、土地利用/覆盖等)特征进行空间统计分析,发现流域河水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值、 $\text{NO}_3^-/\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$  浓度比值以及河水总溶解质浓度从定量上与流域人为活动、流域植被覆盖率与流域地质背景相关。研究证明,乌江流域各子流域碎屑岩(碎屑岩+碎屑岩夹碳酸盐岩)面积百分比和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值总体上呈正相关关系; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值随子流域中碎屑岩所占比例的增大而增大。流域河水显著变化的  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值明显地区分了流域碳酸盐岩和硅酸盐岩风化对河水物质的相对贡献。

喀斯特生态环境对流域地表水的地球化学组成影响也是显而易见的。同样在喀斯特地区,流域耕地面积比例增加,地表水中  $\text{NO}_3^-/\text{HCO}_3^-$  也会增加,而磷酸盐相对于重碳酸根则会减少。流域植被覆盖率增加,水中总溶解离子含量则会明显减少。由于不同生态背景,如石漠化和非石漠化地区,河水中无机碳的同位素组成和硫酸盐的硫同位素组成均有差别:石漠化地区地表水中无机碳的碳同位素和硫酸盐的硫同位素组成变化大,碳同位素组成偏高而硫同位素组成偏低,说明不同生态系统中的养分循环的生物地球化学过程有所不同<sup>[17]</sup>。

#### 4.2 西南喀斯特流域碳-硫-氮耦合循环:人为活动与流域侵蚀

在全球变化和物质循环的核心科学问题研究中,科学家们越来越认识到研究不同元素或化合物生物地球化学循环之间相互作用的重要性<sup>[18]</sup>。地表环境无机过程中,许多元素之间化学反应将不同元素以一定化学计量法则联系起来。大量存在的生源要素的循环,如C、N和S的循环之间是相互联系和制约的,生物对这些营养元素的吸收和限制都遵循一定的化学计量法则,并同时也服从这些元素循环过程中的化学平衡和微生物过程的热力学原理。

实际上,自然界中许多重要元素的循环都是由生物作用参与下的氧化还原过程,并借助于这些过程,地壳中的化学元素都以一定比例进入食物链。人们过去对硫循环的研究工作经常只是孤立地研究硫本身的环境化学过程,但实际上各元素的环境化学过程相互影响。自然和人为释放的气态硫化物,被氧化成硫酸盐气溶胶,降至地面参与其他化学反应而驱动其他元素的循环,地表环境硫化物的氧化形成硫酸加速碳酸盐岩的溶解和厌氧环境中有机质的降解,因此硫的环境化学过程与碳、氮、过渡金

属间具有耦合作用。氮的循环同样与其他元素循环耦合,如水域富营养化过程中,不仅氮与磷的循环耦合,而且有些碳的化合物还能抑制水华的繁殖,改变氮的循环途径。氮、碳、硫、磷等元素均是组成生物体的重要元素,在生态系统循环过程中具有重要耦合作用。如在海洋和湖泊沉积物中元素循环的研究发现:有氧呼吸和硫酸盐还原导致的有机质降解可以致使碳酸盐沉积物和孔隙水化学组成的明显变化<sup>[19-20]</sup>,溶解氧对有机质氧化产生的 $\text{CO}_2$ ,加速了碳酸盐矿物的溶解和饱和;硫酸盐还原菌对硫酸盐的还原可以增加碳酸盐的碱度和过饱和<sup>[21]</sup>;在低Fe环境中,硫酸盐还原的初期阶段, $\text{H}_2\text{S}$ 的增加可造成碳酸盐的不饱和;在化学计量学上硫化物的氧化速率与碳酸盐矿物的溶解有关等<sup>[22]</sup>。

近年来,越来越多的学者发现除大气 $\text{CO}_2$ 溶于水形成碳酸风化岩石或矿物外,硫酸广泛参与了流域岩石矿物的化学风化。例如:对赣达-雅鲁藏布江流域<sup>[23]</sup>、加拿大西部和北部河流<sup>[24-25]</sup>的研究都显示硫化物氧化形成的硫酸对岩石矿物的风化对河水的化学组成具有显著的贡献;Anderson等<sup>[26]</sup>对冰川环境河水的研究发现, $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶解的碳酸盐岩平均占溶解碳酸盐岩总量的22%;Spence和Telmer<sup>[27]</sup>对加拿大科迪勒地区河水的研究发现,81%的河水硫酸盐来自硫化物氧化,25%的总风化阳离子通量归因于硫酸溶解碳酸盐岩和硅酸盐。我们近年通过研究西南喀斯特流域地表水地球化学发现:西南喀斯特地区河水一般含有较多的 $\text{SO}_4^{2-}$ ,从化学计量学、 $\text{SO}_4^{2-}$ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 和溶解无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析发现硫循环中形成的硫酸广泛参与了流域碳酸盐矿物的溶解和流域侵蚀;通过对乌江流域河水硫酸盐离子的硫同位素研究认为,参与流域侵蚀的硫酸主要来自煤系地层硫化物、矿床硫化物的氧化和大气酸沉降,对河水 $\text{SO}_4^{2-}$ 的贡献分别为50%、27%和20.5%,其余2.5%的 $\text{SO}_4^{2-}$ 为硫酸盐蒸发岩的溶解<sup>[16, 28-30]</sup>。

喀斯特流域以化学侵蚀为主,物理侵蚀往往较低,土壤的侵蚀模数一般小于 $100\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,这完全与北方黄土高原等干旱半干旱地区情况不同。刘丛强<sup>[16]</sup>通过地表水离子含量和化学平衡和通量估算了乌江以及西江上游南北盘江流域的碳酸盐岩侵蚀速率,获得的结果表明喀斯特流域碳酸盐的侵蚀速率较大( $99\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 或 $49\text{ mm}/\text{ka}$ ),比世界其他流域的化学侵蚀速率大很多(Seine河盆地约为

25 mm/ka)。我国西南喀斯特流域具有较高的化学侵蚀速率, 这与硫酸参与流域侵蚀加速了碳酸盐岩的溶解有关。

除硫酸以外, 个别情况下还有硝酸参与流域侵蚀改变了我们传统认识的碳循环。由于海洋中硫酸盐比碳酸盐的滞留时间长很多, 因此硫酸风化碳酸盐岩导致海洋碳酸盐的沉淀而向大气净释放  $\text{CO}_2$ 。据刘丛强等<sup>[28]</sup> 估算, 西南喀斯特区域因硫酸侵蚀碳酸盐岩而向大气释放  $\text{CO}_2$  的通量可达  $4.4 \times 10^{12} \text{ g/a}$ , 相当于每年西南碳酸盐岩风化消耗  $\text{CO}_2$  总通量的 33%。另外, 流域农业活动氮肥的施用可以导致流域硝酸盐的增加, 硝酸盐和硫酸盐在厌氧或缺氧环境中并在微生物的作用下大量氧化有机质。我们在对比研究喀斯特流域和非喀斯特流域以及不同石漠化阶段喀斯特流域时发现, 石漠化喀斯特流域有机碳降解以无机碳的形式流失的速率较其他生态环境流域大。以上事实表明, 流域硫和氮的循环与碳循环耦合, 并改变了区域碳循环, 人为过程可以通过释放酸沉降、矿业活动和土地利用等形式加速流域侵蚀和影响流域元素的生物地球化学循环。

## 5 西南喀斯特流域土壤-植被系统养分循环

在地球临界带或地表圈层中, 土壤-植被界面是控制物质循环和生态系统演化以及人类生存环境改变的重要界面, 植物根区矿物化学风化、元素释放迁移、形态转化的生物地球化学作用的研究极为重要, 是我们认识生态系统演化规律及其实质的理论基础。近年来, 我们以典型喀斯特小流域为研究对象, 根据喀斯特石漠化过程的不同阶段或生态演替阶段, 结合基岩性质、土壤类型、水文条件等因素, 利用元素、同位素(如  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^3\text{S}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 示踪和化学计量学理论和方法对喀斯特生态系统中不同界面物质的生物地球化学循环进行了研究: 对岩石-土壤界面, 主要研究矿物在生物作用下化学风化、元素释放规律以及控制元素循环的界面过程, 如水/粒界面吸附解吸过程、水/矿物界面化学反应过程等; 对土壤-植被界面, 重点研究植物根区矿物化学风化、元素释放迁移、形态转化的生物地球化学作用; 对不同植被覆盖下的土壤-大气界面, 主要运用同位素组成和通量研究来研究界面温室气体循环及其控制因素和过程<sup>[17]</sup>。下面我们将重点介绍目前对土壤-植

被系统碳、氮和硫的分布特征及其生物地球化学过程控制机理的主要研究现状或成果。

### 5.1 喀斯特土壤-植被系统碳循环

对土壤碳循环机制的研究是探讨陆地生态系统或流域碳循环的重要前提, 也是深入理解陆地生态系统对全球变化响应机理的重要基础。土壤碳库可分为有机碳库和无机碳库。由于土壤无机碳库相对恒定, 对土壤碳库产生影响的主要是有机碳库。土壤有机碳库的变化涉及一系列的物理、化学和生物过程。土壤有机碳含量则是输入土壤的光合固碳与土壤有机碳分解、侵蚀动态平衡的一种表现形式。输入土壤有机碳的数量和质量, 以及土壤有机碳的损失受气候、生物、地形、土地利用/土地覆被和土地管理, 以及土壤的内在性状等因素控制。这些因素相互叠加, 共同决定了土壤碳循环的速率和途径。

我国西南喀斯特区域地质地貌、气候、土壤内在性质和分布状况, 以及由气候决定的地带性生物条件等均具有很强的独特性<sup>[31-33]</sup>。这些环境条件的独特性, 使得土壤有机碳的来源和含量在不同土壤类型间, 以及在同一类型不同区域土壤间均表现出高度的变异性<sup>[34-37]</sup>。与地带性黄壤不同, 非地带性的石灰土中含有大量的钙镁离子, 能与土壤有机质形成较稳定的腐殖质钙, 因此往往具有较丰富的土壤有机碳。石灰土多分布于坡面地表, 不同部位、不同微地域形态内, 土壤遭受侵蚀的程度不同, 因此石灰土土壤有机碳含量具有高度变异性。

我们近年以贵州中部地区为重点, 并考虑黔东南、黔西北和黔南等不同海拔和气候地区, 对喀斯特地区石灰土和碎屑岩风化形成的黄壤中有机碳和不同形态的硫的分布变化及其控制机理进行了研究。结果发现, 石灰土剖面整体土壤比黄壤剖面的有机碳含量明显高, 尤其对表层土壤这种差别更为突出。另外, 对于不同地形地貌和海拔地区同类石灰土而言, 其土壤有机碳含量分布也是很很不均一的: 土壤有机碳含量随海拔升高而增加, 即使对于同一山坡, 一般坡肩比坡脚土壤的有机碳含量高<sup>[17]</sup>。土地利用改变对石灰土中有机碳影响极大: 耕地和撂荒地土壤的有机碳含量比自然土壤低很多, 而且前者土壤有机碳的碳同位素组成却明显偏高。

如上所述, 自然石灰土的土壤有机碳含量高, 但因耕种活动干扰却很快流失。我们通过研究土壤有机碳和土壤溶解有机碳的碳同位素组成变化发现, 土壤有机碳和溶解有机碳的碳同位素组成在总体趋

势上相同, 在土壤剖面上的分布趋势相似, 说明土壤溶解有机碳主要来自土壤有机碳的降解, 土壤溶解有机碳丢失的多少反映了土壤有机质降解流失速率大小。

## 5.2 喀斯特土壤-植被系统氮循环

土壤氮素循环是高度动态的, 并且有着复杂的转移方式和途径<sup>[38]</sup>。土壤圈中的氮具有其他生源要素所不具备的多形态特征, 在微生物驱动下, 各形态的氮互相转化。一般认为氮循环开始于有机氮化物经矿化作用转变成可被植物吸收利用的  $\text{NH}_4^+$  (同时释放出  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等氮氧化物), 土壤矿化产生的  $\text{NH}_4^+$  以及外源输入的  $\text{NH}_4^+$ , 在被植物根系吸附的同时也会通过硝化作用转变成  $\text{NO}_3^-$ , 在不同土壤理化条件下被植物吸收利用。循环过程中, 硝化的还有反硝化的作用使土壤中的氮素还原成气态回归大气。在大多数的陆地生态系统中, 氮虽然控制着植物的生长过程, 而整个系统的生产能力却也取决于微生物转化能被植物有效利用氮的速率。

氮是构成一切生命体的重要元素, 是生态系统中最重要的一种限制性营养元素<sup>[39-43]</sup>, 是评价土壤肥力和土壤质量的一个非常重要的指标<sup>[44-46]</sup>。对氮的生物地球化学循环的研究目前已经成为土壤科学、环境科学和生态科学研究的热点。和其他地区相比, 喀斯特地区由于特殊的地质背景造就了其生态环境的脆弱性和敏感性。近年来, 不少学者将喀斯特生态系统的退化过程, 即石漠化过程分为初期、中期、后期和完全石漠化 4 个阶段, 认为与这 4 个阶段相对应的植被种类退化趋势依次为次生乔林 → 乔灌林 → 灌木林或藤刺灌丛 → 稀疏灌草坡或草坡 → 稀疏灌草丛<sup>[47-48]</sup>。植被类型与土壤养分动态变化有直接的关系, 即不同植被覆盖或不同退化程度土壤具有不同的养分循环特征, 因此对不同石漠化或退化阶段土壤的氮循环的研究对认识喀斯特生态系统的演化具有重要意义。

很多学者在研究喀斯特区域土壤侵蚀过程中发现, 遭受严重侵蚀的土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、全钾等养分含量水平明显低于坡麓淤积土壤中同类养分的含量<sup>[49]</sup>。据研究, 贵州省铜仁地区 1979—1989 年 10 年中, 大部分区域土壤养分含量的下降是由土壤侵蚀所引起的<sup>[50]</sup>。林昌虎等<sup>[51-52]</sup>在研究不同侵蚀程度石灰土主要化学性质时也发现, 土壤养分的含量水平会随着侵蚀程度的加剧而下降。近些年来, 这些由土壤侵蚀等表现现象所引

起的土壤养分衰减逐渐得到人们的认识, 并把它作为整个西南喀斯特地区生态恶化现象的一种内在表征。目前, 人们对喀斯特生态系统的氮循环研究的成果并不多, 并缺乏系统性和深度。

另外, 近来我们选择适应石灰岩地区土壤的花椒树 (*Zanthoxylum bungeanum*) 幼苗和适应酸性砂岩地区土壤的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 幼苗及其土壤, 通过研究分析植物样品营养元素含量和稳定 C 和 N 同位素比值, 重点探讨植物 N 的利用策略和生物地球化学 N 循环之间的关系、寻找能区分生长在石灰岩和砂岩母质土壤的植物种类利用 N 类型差异的  $\delta^{15}\text{N}$  标记、植物 N 利用策略对其他营养元素的吸收和在植物中积累的影响以及了解不同植被类型之间 N 吸收模式的差异以及与土壤环境变化的关系。

硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N) 与铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ -N) 是作物根系吸收的两种最主要的氮素形态。尽管所有的植物都能吸收和利用铵态氮和硝态氮, 但生境的差异在一定程度上决定了植物对吸收铵态氮、硝态氮的偏好<sup>[53]</sup>。越来越多的证据表明, 植物利用 N 的策略与 N 的生物地球化学循环紧密相关。比如, 先锋植物的根系优先吸收硝酸盐, 其生长的土壤环境以硝化作用为主导; 而演替晚期的植物群落中植物优先吸收铵, 其生长的土壤环境以氨化作用 (ammonification) 为主导<sup>[54-58]</sup>。双柱苏木 (*Dicorynia guianensis*) 优先利用  $\text{NH}_4^+$ , 而另外一种植物镰形木荚苏木 (*Eperua falcata*) 则优先利用  $\text{NO}_3^-$ , 后者的细根系更多分布在容易出现硝化作用的枯枝落叶层, 而前者的细根系却扎根于较深的土壤层中<sup>[59]</sup>。

目前, 我们对西南石灰岩和砂岩地区不同植物种类中的 N 养分和稳定 N 同位素比值的特征及其循环机制差异的研究至今仍然不多。已有的研究认为: 石灰岩地区应当是开放式的 N 循环体系, 喜钙植物具有很高的硝酸盐同化作用的能力, 优先把硝酸盐作为它的喜好 N 源, 并能相应增加土壤 N 的可利用性, 其叶片 N 含量高, 易受缺 P 胁迫作用; 酸性砂岩地区的 N 循环是较为封闭的, 避钙植物优先把  $\text{NH}_4^+$  作为喜好的 N 源, 硝酸盐同化作用能力较低, 对 N 的可利用性变化的能力较低, 其叶片 N 含量较低, 易受缺 N 胁迫作用。目前人们把植物分成缺 P 和缺 N 两个系列, 一般来说, 避钙植物缺 N, 喜钙植物缺 P<sup>[60]</sup>。

### 5.3 喀斯特土壤-植被系统硫循环

科学家们对区域或全球范围内硫的生物地球化学循环及其演化展开了广泛的研究<sup>[61-64]</sup>, 发现硫的生物地球化学循环广泛受到人类活动的强烈扰动<sup>[64]</sup>, 进而对地球表层各个系统的演化产生了重要影响。因此, 充分揭示硫的生物地球化学循环规律及其与生态环境变化的内在联系极为重要<sup>[65]</sup>, 但时至今日, 我们对许多生态系统中硫循环的认识仍然是肤浅的<sup>[66]</sup>。目前, 硫的生物地球化学循环及其生态、环境效应也是中国全球变化与陆地生态系统研究的优先领域之一<sup>[12]</sup>。研究重点包括硫的污染、输送、分布与酸雨的形成和危害, 硫的生物地球化学循环与全球变化的关系, 硫污染及其主要控制对策等。

贵州乌江流域属典型的喀斯特地貌, 是我国酸雨最严重的地区之一<sup>[67-68]</sup>。酸沉降不仅导致土壤中营养元素(如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^{+}$  等)的流失, 而且可以导致具有植物毒性的元素(如  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等)的释放<sup>[69-70]</sup>, 对植被和生态造成破坏。同时, 酸沉降会直接或间接进入河水从而对河水化学产生深远影响<sup>[71-72]</sup>。我们对乌江流域河水化学的研究结果表明, 乌江河水的  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度较世界河流平均值明显偏高, 发现河水  $\text{SO}_4^{2-}$  的来源主要有硫化物氧化、大气酸沉降、点源污染和石膏盐层的溶解<sup>[16, 30]</sup>。如前所述, 人类活动对流域硫循环的影响加速了流域侵蚀, 扰乱其他营养元素的生物地球化学循环。

对流域生态系统硫循环的理解取决于我们对流域土壤-植被系统硫循环的系统研究, 但目前有关方面的研究极少。我们近年对西南喀斯特地区乌江流域不同类型土壤中不同形态的硫(总硫、有机硫、 $\text{SO}_4^{2-}$ -S、单质硫( $\text{S}_0$ -S)、单硫化物硫( $\text{FeS}$ -S)以及黄铁矿硫( $\text{FeS}_2$ -S))含量及其和同位素组成变化进行了研究, 目的在于查明土壤中硫的生物地球化学循环、查明喀斯特地区土壤中硫的来源、深化有关大气酸沉降对土壤含硫物质迁移转化的影响以及乌江流域土壤圈、水圈、大气圈之间硫循环的特征等方面的认识, 深入了解在人类活动扰动下喀斯特地区的硫循环及其对生态环境的影响。研究发现: 流域土壤中大气沉降的硫普遍存在, 大气沉降的  $\text{SO}_4^{2-}$  首先被植物和微生物同化吸收, 同化吸收剩余的  $\text{SO}_4^{2-}$  进入SRB(硫酸盐还原细菌)的异化还原过程; 喀斯特坡地土壤各形态硫含量分布首先与土壤类型有关, 其次与有机质、pH、黏粒及铁铝含量等土壤基本性质有关; 同一类型土壤各形态硫含量深度分布主

要取决于深度相关的硫氧化/还原及同化/矿化反应, 而剖面特异性的硫化物的淋溶和迁移是造成各形态硫含量垂直分布差异的主要原因; 剖面各层均有  $\text{SO}_4^{2-}$  异化还原反应发生, 中层反应强烈, 对应  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 降低和还原态无机硫及碳键硫含量增加; 土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  同化(异化)还原和有机硫矿化是同步进行的, 构成了土壤硫循环的主要内容<sup>[17]</sup>。

## 6 研究展望

目前, 我们对西南喀斯特流域生态系统物质生物地球化学循环的研究所获得的最重要认识是: 喀斯特流域生物地球化学循环活跃, 相互耦合, 并与流域生态环境变化相互制约; 人类活动正干预流域物质的自然生物地球化学循环过程, 并导致相应的生态和环境效应; 全球变化科学深化有赖于区域生态环境变化及物质生物地球化学循环的研究。这些认识是我们将来系统深入开展喀斯特以及其他流域生态系统物质生物地球化学循环研究的重要方向。基于已有的研究获得的科学认识, 将来的喀斯特流域物质生物地球化学循环的研究应该进一步利用地球系统科学的研究方法和理论, 多学科交叉结合, 将区域研究成果与全球变化研究成果结合, 系统认识喀斯特生态环境对全球变化的响应以及全球变化对喀斯特区域生物地球化学循环的影响, 具体研究应该以下列科学问题为重要研究目标。

喀斯特生态环境物质的生物地球化学循环中, 生物作用参与下的水/植被/土壤/岩石系统各界面作用如何影响流域物质的地球化学循环? 对西南喀斯特流域生态环境养分生物地球化学循环的研究中, 我们发现流域大量养分的流失, 从流域尺度上认为养分快速流失可能与石漠化及人为活动有关, 但何种过程和机制制约营养元素的流失并不清楚。因此, 流域生态系统不同单元之间的物质交换过程以及单元中的生物地球化学过程的研究是我们理解流域尺度物质生物地球化学循环的基础。

酸雨(S、N输入)和/或其他人为活动输入物质如何影响流域物质的自然生物地球化学循环和流域化学侵蚀(矿物风化和养分流失)? 喀斯特流域养分流失快的原因是否与流域S、N的循环特别是人为输入S和N以及流域的地质背景(富含含煤地层的自然风化)有关? 我们目前对流域地表水地球化学的研究发现人为大量向流域输入S和N等, 也发现

这些人为输入物质对流域养分生物地球化学循环产生影响并导致相应的生态和环境问题, 但人为输入物质影响流域物质生物地球化学循环的具体过程和机制有待研究, 影响规模、尺度以及生态环境效应都是值得进一步研究的科学问题。

研究发现, 处于不同石漠化阶段或演替阶段的喀斯特生态系统具有不同的养分生物地球化学循环, 但养分循环和生态系统演替之间相互影响机制如何? 生态系统演替是对养分循环的响应还是影响? 了解这些问题是我们进行适应性生态系统调控的理论基础, 并有可能通过有效土壤利用与管理来调控营养元素的生物地球化学循环, 提高喀斯特环境的水土保持能力、促进退化生态的快速恢复。

喀斯特区域物质生物地球化学循环对更大区域乃至全球变化的响应或影响如何? 这一问题对我们进行喀斯特生态建设和管理极为重要。要回答这一问题, 我们有必要将喀斯特生态系统纳入到更大区域或全球生态系统中进行分析研究。在充分理解整个喀斯特生态系统物质生物地球化学循环的基础上, 进一步研究喀斯特生态系统的全球变化响应或影响机制。

## References:

[ 1 ] Fu C B, Dong W J, Wen G, et al. Regional response and adaptation to global change [ J ]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 245-250(in Chinese).

[ 2 ] An Z S, Fu C B. The progress in global change science [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(5): 671-680(in Chinese).

[ 3 ] Sun S. Some thoughts of global change and earth system science studies in China [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 6-10(in Chinese).

[ 4 ] Chen Y Y. Some opinions on developing researches on regional adaptation to global change [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 495-499(in Chinese).

[ 5 ] Zhou X J. Remarks on earth system science [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 513-515(in Chinese).

[ 6 ] Chao J H, Yuan D X, Pei J G, et al. Karst Ecosystem Constrained by Geological Conditions in Southwest China [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 188 (in Chinese).

[ 7 ] Yuan D X. The development of modern karstology in China [ J ]. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 2005 (3): 139-141(in Chinese).

[ 8 ] Yuan D X, Liu Z H. Carbon Cycle and Karst Geo-environment [ M ]. Beijing: Science Press, 2003: 240(in Chinese).

[ 9 ] Bashkin V N. Modern Biogeochemistry [ M ]. Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer Academic Publishers, 2002: 564.

[ 10 ] Vernadsky V I. La Biogeochemie [ M ]. Paris: Sorbonne, 1926: 456.

[ 11 ] Geng A C. Position and application of biogeochemistry cycle study in earth systematic sciences [ J ]. *Journal of Suzhou Institute of Urban Construction and Environmental Protection*, 1999, 12(3): 23-29(in Chinese).

[ 12 ] Fu B J, Niu D, Zhao S D. Study on global change and terrestrial ecosystems: History and prospect [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5): 556-560(in Chinese).

[ 13 ] Ye D Z, Fu C B. Some advance in global change science study [ J ]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2004, 19(5): 336-341(in Chinese).

[ 14 ] Zhou G S, Xu Z Z, Wang Y H. Adaptation of terrestrial ecosystems to global change [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(5): 642-649(in Chinese).

[ 15 ] Jiang G M. Review on some hot topics towards the researches in the field of Plant Physioecology [ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25: 514-519(in Chinese).

[ 16 ] Liu C Q. Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface: Chemical Erosion and Nutrient Cycling in Karstic Catchments, Southwest China [ M ]. Beijing: Science Press, 2007: 608(in Chinese).

[ 17 ] Liu C Q. Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface: Cycling of Nutrients in Soil-Plant Systems of Karstic Environments, Southwest China [ M ]. Beijing: Science Press, 2009: 618(in Chinese).

[ 18 ] Zhuang Y H. Advances in global biogeochemical cycling studies [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(2): 163-168(in Chinese).

[ 19 ] Walter L M, Bishof S A, Patterson W P, et al. Dissolution and recrystallization in modern shelf carbonates: Evidence from pore water and solid phase chemistry [ J ]. *Phil Trans Royal Society, London*, 1993, 344: 7-36.

[ 20 ] Walter L M, Burton E A. Dissolution of recent platform carbonate sediments in marine pore fluids [ J ]. *American Journal of Sciences*, 1990, 290: 601-643.

[ 21 ] Canfield D E, Raiswell R. Carbonate precipitation and dissolution: Its relevance to fossil preservation [ M ] // Allison P A, Briggs D E G. *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. New York: Plenum Press, 1991: 387.

[ 22 ] Ku T C W, Walter L M, Coleman M L, et al. Coupling between sulfur recycling and syndepositional carbonate dissolution: Evidence from oxygen and sulfur isotope composition of pore water sulfate, South Florida Platform, USA [ J ].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 2529-2546. [37] Bureau of General Survey of Soil of Guizhou. Soil in Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou Science & Technology Press, 1994: 711(in Chinese).
- [23] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. Chemical Geology, 1999, 159: 31-60. [38] Lü Y. Non-point pollution of nitrogen in agricultural ecosystem [J]. Agro-Environmental Protection, 1998, 17(1): 35-39(in Chinese).
- [24] Gaillardet J, Millot R, Dupré B. Chemical denudation rates of the western Canadian orogenic belt: The Stikine terrane [J]. Chemical Geology, 2003, 201: 257-279. [39] Xiao Y B, Li W X, Yin Z Y, et al. Uptake and regulation of nitrate in plants [J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2002, 4(2): 56-59(in Chinese).
- [25] Millot R, Gaillardet J, Dupré B, et al. Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67: 1305-1329. [40] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests [J]. Ecology, 1984, 65: 285-298.
- [26] Anderson S P, Drever J I, Frost C D, et al. Chemical weathering in the foreland of a retreating glacier [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 1173-1189. [41] Herrera R. Nitrogen cycling in a tropical amazonian rain forest: The coating of low mineral nutrient status [J]. Ecological Bulletins (Stockholm), 1981, 33: 493-505.
- [27] Spence J, Telmer K. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO<sub>2</sub> fluxes: Evidence from major ions  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in rivers of the Canadian Cordillera [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69: 5441-5458. [42] Gosz J R. Nitrogen cycling in coniferous ecosystems [J]. Ecological Bulletins (Stockholm), 1981, 33: 405-426.
- [28] Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, et al. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China [J]. Geochimica, 2008, 37(4): 404-414(in Chinese). [43] Melillo J M. Nitrogen cycling in deciduous forests [J]. Ecological Bulletins (Stockholm), 1981, 33: 427-442.
- [29] Li S L, Calmels D, Han G, et al. Sulfuric acid as an agent of carbonate weathering constrained by  $\delta^{34}\text{C}_{\text{DIC}}$ : Examples from Southwest China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 270: 189-199. [44] Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, et al. Study on spatial variability and its influential factors of soils nitrogen in typical small watershed in the hilly region of the middle Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 70-75 (in Chinese).
- [30] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. Chemical Geology, 2004, 204: 1-21. [45] Li X A, Xiao H A, Wu J S, et al. Effects of land use type on soil organic carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen contents in Karst region of South China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1827-1831(in Chinese).
- [31] Li T J, Zhao Y, Zhang K L, et al. Soil Geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 383(in Chinese). [46] Fu H, Pei S F, Zhang H R. Total soil nitrogen in the grasslands at different elevations on west-slope of Helan Mountain, Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(6): 50-56(in Chinese).
- [32] Steering Group of Regional Geographic Information of Guizhou. Geographic Information Data in Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou People's Press, 1996: 393(in Chinese). [47] Wang D L, Zhu S Q, Huang B L. Changes of vegetation features of rocky desertification process in karst area of Guizhou [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2003, 27(3): 26-30(in Chinese).
- [33] Zhou Z X. Exploration in Maolan Karst Virgin Forest [M]. Guiyang: Guizhou People's Press, 1987: 386(in Chinese). [48] Long J, Li J, Teng Y, et al. Biological characteristics of soil quality under process of karst environment's degradation in Guizhou Plateau [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(2): 47-50(in Chinese).
- [34] Wang S J, Lu H M, Zhou Y C, et al. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 475-483(in Chinese). [49] Zhu A G. Research on soil erosion in western mountainous region in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(3): 1-7(in Chinese).
- [35] Li Y B, Gao M, Wei C F, et al. Effects of land use on soil quality in karst hilly area [J]. Journal of Mountain Research, 2003, 21(1): 40-49(in Chinese). [50] Lin C H. The slopping farming land utilization and protection in Guizhou mountain region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 43-47(in Chinese).
- [36] Pan G X, Sun Y H, Teng Y Z, et al. Distribution and transferring of carbon in karst soil system of peak forest depression in humid subtropical region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 69-72(in Chinese). [51] Lin C H. Research on soil erosion and environment variation in karst hilly area in Guizhou [J]. Bulletin of Soil and Water

- Conservation, 2002, 16(1): 9-12(in Chinese).
- [52] Lin C H, Zhu A G. A study on soil erosion and prevention in karst mountainous region of Guizhou[ J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 109-113(in Chinese).
- [53] Gigon A, Rorison I H. The response of some ecologically distinct plant species to nitrate- and to ammonium-nitrogen[ J]. Journal of Ecology, 1972, 60: 93-102.
- [54] Min X, Siddiqi M Y, Guy R D, et al. A comparative kinetic analysis of nitrate and ammonium influx in two early-successional tree species of temperate and boreal forest ecosystems [ J]. Plant, Cell and Environment, 2000, 23: 321-328.
- [55] Lavoie N, Vézina L P, Margolis H A. Absorption and assimilation of nitrate and ammonium ions by jack pine seedlings [ J]. Tree Physiology, 1992, 11: 171-183.
- [56] Fredeen A L, Griffin K, Field C B. Effects of light quantity and quality and soil nitrogen status on nitrate reductase activity in rainforest species of the genus piper[ J]. Oecologia, 1991, 86: 441-446.
- [57] Stewart G R, Hegarty E E, Specht R L. Inorganic nitrogen assimilation in plants of Australian rainforest communities [ J]. Physiologia Plantarum, 1988, 74: 26-33.
- [58] Vitousek P M, Matson P A. Nitrogen transformations in a range of tropical forest soils[ J]. Soil Biology and Biochemistry, 1988, 20: 361-367.
- [59] Schimann H, Ponton S, Hättenschwiler S, et al. Differing nitrogen use strategies of two tropical rainforest late successional tree species in French Guiana: Evidence from  $^{15}\text{N}$  natural abundance and microbial activities[ J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40: 487-494.
- [60] Pu H C, Liu C Q. Environmental geochemistry research should concern "life ratio" and "balance system"[ J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(Suppl): 10-14(in Chinese).
- [61] Howarth R W, Stewart J W B, Ivanov M V. Sulphur Cycling on the Continents: Wetlands, Terrestrial Ecosystems, and Associated Water Bodies[ M]. New York: John Wiley & Sons, 1992: 376.
- [62] Krouse H R, Grinenko V A. Stable Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment[ M]. New York: John Wiley & Sons, 1991: 440.
- [63] Brimblecombe P, Lein A Y. Evolution of the Global Biogeochemical Sulphur Cycle[ M]. New York: John Wiley & Sons, 1989: 276.
- [64] Ivanov M V, Freney J R. The Global Biogeochemical Sulphur Cycle[ M]. New York: John Wiley & Sons, 1983: 495.
- [65] Streets D G, Bond T C, Camichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[ J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2003, 108: 1-81.
- [66] Mayer B. Assessing sources and transformations of sulphate and nitrate in the hydrosphere using isotope techniques[ M] // Aggarwal P K, Gat J R, Froehlich K F O. Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science. Netherlands: Springer, 2005.
- [67] Larsen T, Lydensen E, Tang D, et al. Acid rain in China [ J]. Environmental Science & Technology, 2006, 15: 418-425.
- [68] Xing X J. The tendency analysis of acid rain pollution in recent years in Zunyi City[ J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2001, 25(4): 35-36(in Chinese).
- [69] Prietzel J, Mayer B, Legge A H. Cumulative impact of 40 years of industrial sulfur emissions on a forest soil in west-central Alberta (Canada)[ J]. Environmental Pollution, 2004, 132: 129-144.
- [70] Driscoll C T, Driscoll K M, Mitchell M J, et al. Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State[ J]. Environmental Pollution, 2003, 123: 327-336.
- [71] Novák M, Kirchner J W, Groscheova H, et al. Sulfur isotope dynamics in two central european watersheds affected by high atmospheric deposition of  $\text{SO}_x$ [ J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 367-383.
- [72] Alewell C, Mitchell M J, Likens G E, et al. Sources of stream sulfate at the Hubbard Brook Experimental Forest: Long-term analyses using stable isotopes[ J]. Biogeochemistry, 1999, 44: 281-299.

### 参考文献:

- [ 1 ] 符淙斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域相应和适应[ J]. 气象学报, 2003, 61(2): 245-250.
- [ 2 ] 安芷生, 符淙斌. 全球变化科学的进展[ J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 671-680.
- [ 3 ] 孙枢. 对我国全球变化与地球系统科学研究的若干思考[ J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 6-10.
- [ 4 ] 陈宜瑜. 对开展全球变化区域适应研究的几点看法[ J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 495-499.
- [ 5 ] 周秀骥. 对地球系统科学的几点认识[ J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 513-515.
- [ 6 ] 曹建华, 袁道先, 裴建国, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[ M]. 北京: 地质出版社, 2005: 188.
- [ 7 ] 袁道先. 现代岩溶学在我国的发展[ J]. 中国科学基金, 2005 (3): 139-141.
- [ 8 ] 袁道先, 刘再华. 碳循环与岩溶地质环境[ M]. 北京: 科学出版社, 2003: 240.
- [ 11 ] 耿安朝. 生物地球化学循环研究在地球系统科学中的地位与应用[ J]. 苏州城建环保学院学报, 1999, 12(3): 23-29.

- [12] 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 556-560.
- [13] 叶笃正, 符淙斌. 全球变化科学领域的若干研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(5): 336-341.
- [14] 周广胜, 许振柱, 王玉辉. 全球变化的生态系统适应性[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 642-649.
- [15] 蒋高明. 当前植物生理生态研究的几个热点问题[J]. 植物生态学报, 2001, 25: 514-519.
- [16] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 608.
- [17] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特土壤植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 618.
- [18] 庄亚辉. 全球生物地球化学循环研究的进展[J]. 地学前缘, 1997, 4(2): 163-168.
- [28] 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[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 404-414.
- [31] 李天杰, 赵焯, 张科利, 等. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 383.
- [32] 贵州省区域地理信息项目领导小组. 贵州省地理信息数据集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1996: 393.
- [33] 周正贤. 茂兰喀斯特森林考察集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 386.
- [34] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 475-483.
- [35] 李阳兵, 高明, 魏朝富, 等. 土地利用对岩溶山地土壤质量性状的影响[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 40-49.
- [36] 潘根兴, 孙玉华, 滕永忠, 等. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 69-72.
- [37] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994: 711.
- [38] 吕耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 35-39.
- [39] 肖焱波, 李文学, 殷宗颜, 等. 植物对硝态氮的吸收及其调控[J]. 中国农业科技导报, 2002, 4(2): 56-59.
- [44] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 70-75.
- [45] 李新爱, 肖和艾, 吴金水, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1827-1831.
- [46] 傅华, 裴世芳, 张洪荣. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤氮特征[J]. 草业学报, 2005, 14(6): 50-56.
- [47] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2003, 27(3): 26-30.
- [48] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47-50.
- [49] 朱安国. 贵州西部山区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(3): 1-7.
- [50] 林昌虎. 贵州山区坡耕地的利用与保护[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 43-47.
- [51] 林昌虎. 贵州喀斯特山区土壤侵蚀与环境变异的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 9-12.
- [52] 林昌虎, 朱安国. 贵州喀斯特山区土壤侵蚀与防治[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 109-113.
- [60] 朴河春, 刘丛强. 环境地球化学研究应关注“生命比值”和“平衡体系”两个概念[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(增刊): 10-14.
- [68] 幸筱炯. 遵义市近年来酸雨污染趋势分析[J]. 贵州气象, 2001, 25(4): 35-36.

## 通 知

愿加入本刊理事会的单位请与本刊直接联系(010-82322973, E-mail: frontier@cugb.edu.cn), 也可与代做此项工作的运营支持单位联系(北京一粒砂信息咨询有限公司, 经理唐熙文, 13522333977, 010-80502771, E-mail: tangxiwen8@yahoo.com.cn)。本刊近期将发出对理事单位的第1号通知, 公布第1届理事会活动内容, 落实对理事单位的承诺。