

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

刘丛强 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

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

刘丛强等 著

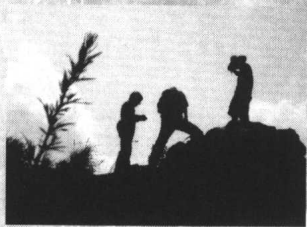
科学出版社

北京



感谢我的学生、合作伙伴和家人，是他们和他们和她让我学到了很多！

刘丛强



序

主量和微量元素在地球环境中进行着无休止的循环。在大气圈、水圈和岩石圈的各个界面上的物质循环受生物圈控制，因为生物圈中生物（植物、动物和微生物）直接或间接地影响各种化学，最终影响各种物理变化。在研究地表圈层物质循环中，地球化学这门学科日益发挥着重要作用，并逐步与生态和环境科学等学科的交叉形成了一门年轻的交叉学科，即环境生物地球化学。环境生物地球化学主要研究自然环境或受人类干扰的环境中受生物，特别是微生物活动控制的化学反应过程及其对地表圈层物质循环的控制机理。

我国西南喀斯特生态环境是一种脆弱的生态环境，长期以来的人为干扰使得这块土地水土流失、生态系统逐渐退化，直接影响着该区人类的生存。喀斯特地质、地理、土壤和生态学家们对我国喀斯特生态、环境科学和相关科学发展以及生态环境治理实践等方面做出的贡献是显著的。相对而言，地球化学家们在喀斯特生态与环境科学研究中所做出的贡献还不够。不同于进行宏观尺度研究的地理和生态学家们，进行微观甚至到分子和原子尺度研究的地球化学家们所做的研究工作，似乎与宏观区域的生态系统和环境变化的研究没有关系或关系甚远，而且地球化学家们面对山山水水的地形地貌、不同植被覆盖和不同程度裸露碳酸盐岩的山地或丘陵或不同程度退化的喀斯特生态系统却因研究对象的尺度过于宏观而往往不知研究从何处着手。但细致一想则不然。物质的生物地球化学循环是大自然的内在规律，循环特征与特定的生态系统和环境有关。不同生态系统和环境中的物质生物地球化学循环以及控制物质循环的

生物地球化学过程特征自有区别，了解这些区别则是我们理解某种生态系统和环境演化内在因素的关键。研究地表环境中物质的生物地球化学循环以及控制物质循环的生物地球化学过程机理则是地球化学家们应具有的本事或学科优势，本成果专著在这方面就是一个典型的成功例子。

近十年来，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以刘丛强研究员为学术带头人的课题组，以西南喀斯特生态系统退化和环境变化的生物地球化学过程机理为核心科学问题，充分发挥同位素、化学反应平衡和化学计量分析理论和研究手段优势的同时，积极学习和结合生态学、地理学、水文地质学等学科知识，通过研究喀斯特流域大气降水、地表水、地下水和湖泊的地球化学组成特征及其变化规律，在我国西南喀斯特流域有关生物地球化学过程、物质循环及其生态环境效应研究方面获得了具有重要理论和实践意义的科研成果。该成果专著揭示了酸雨的地球化学特征及物质来源、喀斯特流域侵蚀、养分循环及其与生态环境变化的关系、湖泊系统多界面物质生物地球化学循环过程与湖泊环境变化的联系、流域养分输出过程中的水库效应、喀斯特地下水系统水-岩作用以及地表水和地下水相互作用与地下水环境质量变化规律等。该成果专著是一项多学科交叉研究生态环境变化的物质循环响应规律的代表性专著，很大程度上丰富了传统表生地球化学的研究内容。

本成果专著从地球系统科学、全球变化及其区域响应、生物地球化学过程和物质循环研究的基本概念介绍着手，论述了在地球系统科学理论指导下，对喀斯特流域物质的水文和生物地球化学循环及其环境效应的研究思路和学术思想，对目前地表生物地球化学过程和物质循环及其生态环境效应的研究具有学术指导或借鉴意义。该成果专著展示了通过多种实验研究手段获得的丰富而翔实的实验数据，基于大量观察和实验结果的

分析推理和通过系统科学论证获得的丰富而重要的科学结论。该成果专著的出版，在推动地球化学学科与生态学和环境科学及其他学科的交叉、推动生物地球化学新兴学科的发展、系统深化和提高我们对喀斯特生态环境变化的生物地球化学机理的认识等方面具有重要的学术贡献。

值此专著出版之际，我乐于为之作序，并表示祝贺。

李光远

2007.1.10

前 言

西南喀斯特地区面积约五十余万平方公里，在全球三大喀斯特集中分布区中为连片裸露碳酸盐岩面积最大和生态最脆弱的地区。该地区山地面积大，可溶岩成土速率缓慢，土层薄，容许土壤流失量低，水土流失危险度高，是非地带性的脆弱生态区域。目前水土流失、石漠化土地面积已占该区喀斯特面积的相当部分，而且还有扩大的趋势。石漠化不仅使土地生产力下降、地表植被覆盖率锐减、系统水源涵养能力削弱、地表水源枯竭，而且造成土地资源丧失、粮食减产，直接影响着该区生活的一亿多人口的生存，并因该区地处长江和珠江两大水系的上游而对中国半壁江山的生态安全产生潜在威胁。因此，科学家们对喀斯特生态系统退化和环境恶化的机理和对策的研究将会造福于国家、造福于人民及其子孙后代。

喀斯特流域-湖泊物质的生物地球化学循环制约着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。基于这种理解，近十年来我们主要在中国科学院重要方向项目（我本人作为首席科学家）等科研项目的资助下，以我国西南喀斯特流域-湖泊系统物质的水文和生物地球化学循环为研究核心，重点开展了西南喀斯特流域大气降水、地表水、地下水和水库或湖泊水体的地球化学研究，拟解决有关流域侵蚀、养分流失和人为活动导致的环境恶化及其与流域生态系统变化之间的关系等科学问题。获得的研究成果是丰富而有意义的，本书对这些研究成果进行了全面的总结。

本书共计六篇：第一篇概述了中国西南地理、地质和生态环境特征，并就本研究立项的学术思路与研究背景进行了介绍；第二篇介绍了贵阳市的干湿沉降物地球化学与大气环境的研究成果；第三篇介绍了西南喀斯特河水地球化学与流域地质和生态环境的研究成果，重点介绍了西南喀斯特流域、乌江和西江（珠江水系）流域河水的地球化学特征及其与流域侵蚀过程和养分流失的关系；第四篇论述了对喀斯特城市，即贵州省两个主要城市（贵阳和遵义）地下水和地表水的地球化学，重点讨论了喀斯特地下水化学组成变化特征及其自然和人为过程的控制机理以及有关地下水环境污染问题；第五篇论述了乌江干流及其水库中营养元素的生物地球化学；第六篇论述了喀斯特地区湖泊系统多界面物质的生物地球化学循环。

本书介绍的研究成果和本书的总结出版是在我的数届博士研究生王中良、肖化云、韩贵琳、赵志琦、徐志方、傅平青、郎赞超、李思亮、胡健、朱俊、蒋颖魁、洪冰、李军、吴攀和唐从国，以及合作伙伴王仕禄博士、陶发祥博士、王雨春博士的大力支持和共同努力下完成的，他（她）们的部分博士论文和研究成果以及与我本人共同发表的科学论文是本书写作的基础。他（她）们分别是有关研究工作的合作完成者，并参与了本书有关章节的总结：第一篇，刘丛强、王中良、吴攀；第二篇，刘丛强、胡健、洪冰、肖化云；第三篇，刘丛强、赵志琦、陶发祥、韩贵琳、蒋颖魁、徐志方；第四篇，刘丛强、郎赞超、李思亮；第五篇，刘丛强、朱

俊、王雨春；第六篇，王仕禄、王雨春、刘丛强、肖化云、傅平青。全书在大家协作的基础上，由刘丛强执笔完稿。

我总认为，我们从事地球化学研究的学者们的任何一项系统研究工作的全面总结都是阶段性的，总结时往往都有成功的喜悦和深感不足的遗憾。但换句乐观或符合自然科学研究规律的话来讲，由于我们前期的工作使我们能站到更高的高度去发现新的科学问题和认识到过去工作的不足。也正是这样，我们课题组因此而基于前期工作凝练新的科学问题，申请到国家自然科学基金委员会的基金项目就有十余项，2006年启动的、由本人作为首席科学家主持的国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”的立项在一定程度上也得益于本书总结的前期工作，也体现该研究领域国家目标的重要性和科学问题的前沿性。这些研究项目的完成将使我们的工作和成果更系统更深入，更进一步逼近科学真理，真正从本质上理解喀斯特流域物质的水文和生物地球化学循环及其生态环境效应的科学问题。

本书的研究成果得到以下基金项目的资助，特此感谢：1) 中国科学院知识创新工程重要方向项目（项目号 KZCX2-105），西南喀斯特流域-湖泊物质的水文地球化学循环及其生态环境效应，2003~2005；2) 国家重点基础研究发展计划（973计划）项目（项目号 2006CB403200），西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控，2006~2010；3) 国家自然科学基金重点项目（项目号 90610037），乌江水能开发对流域水环境影响的因素辨识及其表征体系研究，2007.01~2010.12。另外还得到以下国家自然科学基金面上项目的部分资助：1) 云贵高原湖泊的溶解 N_2O 及其释放通量（项目号 40073032），2001.01~2003.12；2) 地下水污染的硼同位素地球化学示踪研究（项目号 40273039），2003.01~2005.12；3) 雨水中的硫同位素信号及其对人为和自然过程的响应（项目号 40273043），2003.01~2005.12；4) 沉积物有机碳氮同位素记录富营养化湖泊古生产力演化（项目号 40373039），2004.01~2006.12；5) 西南乌江河水中 SO_4^{2-} 来源与流域化学侵蚀（项目号 40372108），2004.01~2006.12；6) 大气和地表污染物输入对贵阳地下水系统的影响：氯和硫同位素研究（项目号 40603004），2007.01~2009.12；7) 利用同位素辨识西南岩溶地下水氮季节转换的生物地球化学过程（项目号 40603005），2007.01~2009.12。

最后，我很感谢我的导师涂光炽先生为这本书作序。本项研究成果在项目设计立项、实施和总结过程中始终努力遵循了涂光炽先生的教导：设想要海阔天空，观察要全面细致；实验要准确可靠，分析要客观周到；立论要有根有据，推论要适可而止；结论要留有余地，文字要言简意赅。涂光炽先生的上述题词代表了老一辈科学家们对我们年轻一代科学工作者寄予的无限希望，是我们从事科学研究并真正获得成功所必须具有的学风，将永远指导我们的科学研究工作。值此本成果专著问世之际，我深深敬佩涂光炽先生等老一辈科学家们对中国地球化学科学事业发展和人才培养方面做出的重大贡献，感谢我的老师们和同事们对我科研工作的关心与支持。

刘丛强

2006年12月

目 录

序
前言

第一篇 研究区域概况与学术思路

引言	3
第一章 中国西南地理、地质和生态环境特征	4
第一节 自然地理	4
第二节 地质环境	11
第三节 主要生态与环境问题	18
第二章 学术思路与研究背景概况	32
第一节 地球系统科学观与全球和区域变化研究	32
第二节 生物地球化学过程与生物地球化学循环	35
第三节 研究背景概况	40
参考文献	42

第二篇 干湿沉降物地球化学与大气环境

引言	51
第一章 贵阳市大气化学与锶同位素组成特征	52
第一节 干湿沉降物的化学组成特征	52
第二节 大气降水的锶同位素地球化学	61
第三节 气溶胶主要离子化学组成特征	64
第二章 贵阳市大气环境中硫同位素地球化学	70
第一节 贵阳市大气 SO_x 浓度变化特征	71
第二节 贵阳市大气中硫同位素组成特征	73
第三章 贵阳市大气环境中的氮同位素地球化学	91
第一节 大气氮及其同位素组成	91
第二节 贵阳市雨水中硝酸盐的氮同位素组成特征及来源	92
第三节 贵阳市雨水中铵盐的氮同位素组成特征及来源	94
第四章 贵阳市大气环境中颗粒态多环芳烃特征	95

第一节	大气环境中多环芳烃的研究	96
第二节	市区和城郊大气颗粒态多环芳烃的种类及分布特征	99
第三节	控制大气颗粒态多环芳烃的主要因素	103
第四节	大气颗粒态多环芳烃的来源辨析	110
	参考文献	115

第三篇 喀斯特河水地球化学与流域地质和生态环境

引言	127	
第一章 喀斯特河水地球化学与流域侵蚀	127	
第一节	河水地球化学研究现状	127
第二节	流域地质地理背景	130
第三节	喀斯特河水地球化学组成特征	139
第四节	河水地球化学组成与流域侵蚀过程和速率	148
第二章 河水碳同位素组成变化与流域碳循环	169	
第一节	流域土壤有机碳和无机碳与流域生态系统的健康	169
第二节	生态系统碳循环中的碳同位素分馏	174
第三节	河流中的碳对流域陆地生态系统碳循环的响应	180
第四节	乌江和沅江水系 PIC、POC 及其碳同位素组成的时空变化	182
第五节	乌江和沅江水系 DIC、DOC 及其碳同位素组成的时空变化	187
第三章 喀斯特流域硫循环与流域侵蚀	193	
第一节	硫同位素及其在硫循环研究中的应用	193
第二节	乌江河水硫酸盐及其硫同位素组成	197
第三节	硫循环与流域侵蚀：流域碳酸盐岩的硫酸风化过程	200
第四节	S-C-N 耦合循环与流域侵蚀：流域有机碳降解与流失	215
第四章 西江（珠江）水系硼同位素地球化学	217	
第一节	硼同位素地球化学研究进展	217
第二节	西江河水中硼的地球化学特征	229
第三节	西江水系河水中硼同位素组成变化的主要控制因素	240
第四节	河水中硼的来源辨识	243
第五节	河流体系硼同位素的环境地球化学意义	248
	参考文献	249

第四篇 喀斯特城市地下水和地表水地球化学

引言	265
第一章 地下水资源与水环境研究现状	266

第一节	地下水资源与环境现状	266
第二节	地下水水文地质与地球化学研究概述	267
第三节	中国喀斯特地下水资源与水环境研究动态	273
第二章	贵阳市和遵义市地理与水文地质特征	275
第一节	贵阳市	275
第二节	遵义市	278
第三章	地下水和地表水的化学组成特征	281
第一节	水体的野外参数变化特征	282
第二节	主要元素组成变化特征	292
第三节	地下水有机碳的分布特征	297
第四章	地下水和地表水的稳定同位素地球化学特征	301
第一节	碳同位素地球化学	302
第二节	锶同位素地球化学	308
第三节	硫同位素地球化学	311
第四节	氮同位素地球化学	315
第五节	氯同位素地球化学	322
第五章	喀斯特地下水文系统水-岩相互作用与物质来源	325
第一节	主要地球化学过程与喀斯特地下水的化学组成	326
第二节	含水层中的水-岩相互作用	332
第三节	硫循环与碳酸盐岩化学风化	341
第六章	地下水中污染物的迁移与转化	346
第一节	研究区域污染特征物质的来源	346
第二节	地下水和地表水相互作用的地球化学证据	348
第三节	水化学和同位素在污染源研究中的应用	353
	参考文献	375

第五篇 乌江干流及其水库中营养元素的生物地球化学

引言	387	
第一章 研究现状与意义	388	
第一节	水库环境效应及其研究现状	388
第二节	乌江流域水库效应研究的重要意义	392
第二章 乌江干流营养元素分布特征	395	
第一节	乌江干流营养元素的含量变化	395
第二节	乌江干流营养元素分布特征及水库效应	398
第三章 水库中营养元素分布与水库生物地球化学过程	404	
第一节	溶解有机碳分布规律	404

第二节	氮分布规律	406
第三节	磷分布规律	410
第四节	硅分布规律	414
第五节	各营养元素与叶绿素 a 的关系	416
第四章	水库现代沉积过程中营养元素的活化更新	419
第一节	水库沉积物间隙水中营养元素的分布特征	420
第二节	水库沉积物—水界面营养元素的扩散通量	425
第三节	界面扩散迁移对上覆水体营养元素的贡献	427
第五章	水库对河流营养元素输送通量的影响	428
第一节	水库输入源和输出源中营养元素的浓度	428
第二节	水库营养元素输入通量和输出通量的估算	434
第三节	水库叶绿素 a 输入输出通量变化	436
	参考文献	437

第六篇 喀斯特地区湖泊系统多界面物质的生物地球化学循环

引言	447	
第一章 红枫湖、百花湖、阿哈湖地理环境特征	448	
第一节	湖泊流域人文经济地理	448
第二节	湖泊流域自然地理	449
第二章 喀斯特湖泊一般水化学特征	455	
第一节	水体物化参数时空变化规律	455
第二节	水化学主成分组成	459
第三节	湖水化学与溶质来源分析	462
第三章 湖泊溶解有机质的分布及荧光光谱特征	465	
第一节	地表水体中的天然溶解有机质	465
第二节	高原湖泊水体中的溶解有机质	471
第三节	沉积物孔隙水中的溶解有机质	477
第四节	太阳辐射对 DOM 荧光光谱特征的影响	484
第四章 湖泊碳的生物地球化学循环	487	
第一节	流域-湖泊的碳循环	487
第二节	红枫湖流域-湖泊碳的迁移转化过程	490
第三节	红枫湖碳循环的同位素示踪	498
第四节	湖泊界面碳的生物地球化学循环过程与环境效应	506
第五节	湖泊(水库)温室气体(CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O)产生和释放	511
第五章 湖泊氮的生物地球化学循环	521	
第一节	氮转化的一般生物地球化学过程与同位素分馏	521

第二节	红枫湖夏季生物同化作用与有机质降解	525
第三节	红枫湖秋季反硝化作用与有机质降解	534
第四节	红枫湖冬春季氮的混合与有机质降解	540
第五节	红枫湖、百花湖沉积物—水界面氮的地球化学循环	545
第六章	湖泊磷的生物地球化学循环	553
第一节	湖泊系统磷生物地球化学循环概述	553
第二节	红枫湖、百花湖沉积物中磷的地球化学形态	558
第三节	红枫湖、百花湖沉积物—水界面磷的生物地球化学作用	568
第四节	红枫湖、百花湖沉积有机质降解对氮、磷的改造作用	579
第五节	红枫湖、百花湖沉积物溶解磷的早期成岩作用模式	583
	参考文献	592

第一篇

研究区域概况与学术思路



引 言

中国西南地质、地理与生态和环境特征主要体现了喀斯特地区的相应特征。地质运动、地球化学过程、生物作用、人文因素的复杂结合造就了西南独特和多变的地质、地理和人文奇观——喀斯特地貌和喀斯特社会与经济。

徐霞客是中国乃至世界上开创喀斯特研究的先驱者之一。早在明代就对我国南方湘、桂、黔、滇各省的喀斯特地貌连续分布区进行了长期考察，详细记录下喀斯特地貌类型的分布和发育规律。徐霞客完成了他极富见地的总结：“粤西之山，有纯石者，有间石者，各自分行独挺，不相混杂。滇南之山，皆土峰缭绕，间有缀石，亦十不一二，故环洼为多。黔南之山，则介于二者之间，独以逼耸见奇。滇山惟多土，故多壅流成海，而流多浑浊。粤山惟石，故多穿穴之流，而水悉澄清。而黔流亦介于二者之间。”典型多样的喀斯特地貌遍布西南，地表和地下双层水系纵横交错。“天下山峰何其多，唯有此处峰成林”，“磅礴数千里，为西南之奇胜”的描述或慨叹便是贵州西南地区的“万峰林”。“天无三日晴，地无三尺平”，“冬无严寒，夏无酷暑”，便是西南贵州地理与气候的高度概括。

然而，就在这块喀斯特地理奇观上，由于人类粗放耕作、过度樵采、石山放牧等掠夺式开发利用土地资源，山地水土流失、土壤退化进而土地石漠化，便形成了中国西南独具特征的喀斯特环境与喀斯特经济与社会。“乱石吞舄地，牛都进不去。春耕一大坡，秋收几小箩。”这就是对我国西部石漠化山区农民严酷的生产生活条件的真实写照。一位记者描述道：石头缝里刨饭，十几里外挑水，对于石漠化地区的人们来说，那些静止不动的石头，就像洪水猛兽般可怕。为了从石缝里仅存的泥土中种出玉米，刨一碗饭吃，人们起早贪黑，整日在山间忙碌。一方水土养不活一方人：在中国西南的贵州，凡石漠化严重的地方，就是最贫困的地方。

喀斯特科学工作者们基于他们多年的工作总结道：特殊的喀斯特地质地貌结构，致使水土资源分配不平衡；喀斯特山区碳酸盐岩风化土速率低、土层薄、生态环境脆弱；在人类活动干扰下喀斯特山区常发生水土流失，并在很多地方产生石漠化。多年生活和工作在喀斯特地区的科技与行政管理的人们常常说道：“喀斯特山区石漠化治理是一项综合性的系统工程，涉及科技、国土资源、农业等部门的工作。只要各相关职能部门密切配合、政府投资到位、人类不破坏、封山彻底和加以科学的规范管护，给荒山石山更多的休养生息时间，几十年后，石漠化——这一世界性难题就有可能被攻克。”

以上便是对我国西南地质地理、生态环境和社会经济，以及喀斯特生态与环境科学研究的高度概括的描述。任何科学研究离不开自然和人文环境，喀斯特地质、地理、生态环境的科学研究是这样，喀斯特环境地球化学的研究也是如此：地球化学被应用到西南这块喀斯特土地上，就变成了喀斯特地质地球化学、喀斯特地理地球化学、喀斯特生态环境地球化学和喀斯特人类-生物地球化学。这是本书安排本篇描述西南地质地理、生态环境与社会经济和介绍地球化学用于研究喀斯特生态与环境问题的学术思路的初衷。另外，任何一项科学研究都有一定的