

HbH

碳酸盐岩 与环境

(卷二)

万国江 等 著



地震出版社

环境地球化学国家重点实验室 1995~1996 年度资助项目

部分获国家自然科学基金(49333040;49894170;49463011;499903007)

中国科学院“九五”重大项目专题(KZ951-A1-402-06-04)及中国博士后基金资助

碳酸盐岩与环境

(卷二)

万国江 等 著

地震出版社

2000

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩与环境. 第2卷/万国江等著. --北京:地震出版社, 2000. 10
ISBN 7-5028-1792-1

I. 碳… II. 万… III. 碳酸盐岩-研究 IV. P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 36491 号

碳酸盐岩与环境
(卷二)

万国江 等 著

责任编辑: 宋炳忠

责任校对: 王花芝

*

地震出版社 出版发行

北京民族学院南路 9 号

北京地大彩印厂印刷

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 8.25 印张 212 千字

2000 年 10 月第一版 2000 年 10 月第一次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-5028-1792-1/P·1056

(2323) 定价: 18.00 元

序

我国南方碳酸盐岩出露的地区，称岩溶地区，有的石山裸露，有的绿树成林，呈现出截然不同的景观。这一个矛盾的现象向科学界提出了一个重要的问题和一个紧迫的问题。

问题的紧迫性在于碳酸盐岩地区的经济亟待振兴。我国南方 7 个省区联片岩溶区就有 1 亿人居住；仅贵州一个省的岩溶区域就养育着 2700 万人口。尽管这些地区有丰富的水能资源、矿产资源、生物资源和旅游资源，但因地势崎岖、土层浅薄、生产力低下，贫困往往与之关联。特别是南方石山荒漠化仍有扩大的势头。为了 21 世纪经济持续发展，急需认真对待碳酸盐岩区域的环境问题。

碳酸盐岩区域环境问题的重要性还在于碳酸盐岩是地球上最大的碳元素寄宿体。它既与大气、水体联系，又与生物、有机质关联。在地球环境演化和生物繁演的历史长河中，碳酸盐岩的沉积成岩及其溶蚀分解总是占举足轻重的地位。碳酸盐岩既记录着地球的历史，又影响着各个地质时期的生态环境条件。碳酸盐岩区域环境的研究在全球时空尺度上具重要价值。

然而，碳酸盐岩区域总是存在着矛盾的方面：同样是石山，荒漠与森林并存。这其中，有地史演化的因素，也有人类活动的干扰。正确认识自然作用与人为影响的关系更是改善石山环境，维护碳酸盐岩区域环境质量的基础。

碳酸盐岩区域环境与其经济协调发展的问题已提到议事日程，受到社会各界的重视。“改造自然”需以认识自然作基础；“人力胜天”需以顺应自然规律作前提。深刻认识碳酸盐岩区域环境问题的产生和影响，寻求碳酸盐岩区域环境质量改善和提高的工程技术途径的紧迫重任已摆在当代科学技术工作者面前！

环境地球化学国家重点实验室已将碳酸盐岩区域环境的研究当作己任。自她一开始受理客座研究时，就将碳酸盐岩区域地球化学敏感性和生态环境脆弱性的研究作为资助重点。继前期出版客座研究专著《碳酸盐岩与环境》（卷一）着重讨论碳酸盐岩区域的侵蚀作用之后，本书作为客座研究的第二批成果，以翔实的最新研究资料，对碳酸盐岩区域镶嵌景观形成的地质背景、景观特征和浮土类型、土层 CO_2 和氧化铁矿物、土壤酸化缓冲容量、含钾岩石供钾潜力进行了系列探讨；对流域碳-氮-硫-磷循环的归宿及其沉积记录进行了实例剖析；并谋求从热力学状态场论的最新进展中认识碳酸盐岩区域环境演化的趋势。本书对碳酸盐岩区域环境脆弱性的认识为环境整治提供了科学基础，并将发挥重要的作用！

刘东生

前言

五年前我们出版了《碳酸盐岩与环境》(卷一)。该书的研究工作聚焦于黔中喀斯特区域侵蚀及环境效应。研究中以多学科相结合的野外考察和翔实的实验资料作基础,通过核素示踪、水化学平衡、XPS 分析、地物遥感光谱及模拟实验,获得大量翔实科学数据。在国际上首次用宇宙线散落核素 ^{10}Be 示踪碳酸盐岩地区表土季节性侵蚀;首次获得碳酸盐岩上覆红色风化壳氧化铁矿物表面化学特征;论证了区域水化学组分不稳定性;揭示了碳酸盐溶蚀和溶蚀后再结晶过程与大气 CO_2 的耗损和逸散关系;定量论证了侵蚀区土层负增长状态;证实了碳酸盐岩风化过程酸控制因素及土壤对酸沉降敏感机制。上述研究进展,对认识碳酸盐岩区域环境演化、地球化学敏感性和生态环境脆弱性具有重要理论价值;对石山化过程的认识、表土侵蚀的评价、酸沉降影响的防治等具有重要实际意义。从而,为碳酸盐岩区域环境保护和经济社会协调发展决策提供了重要的科学基础,并于1998年获得贵州省科技进步二等奖。

研究进展还表明:镶嵌景观既是碳酸盐岩区域环境的重要特征,又是碳酸盐岩区域侵蚀作用的必然结果。对镶嵌景观形成、演化、特征和效应的认识,必然有助于碳酸盐岩区域环境质量的维护和生态系统的协调,从而对碳酸盐岩区域资源开发利用、经济社会发展产生积极的影响。

有鉴于此,在前期研究进展的基础上,我们进一步开展了以碳酸盐岩区域镶嵌景观的形成、演化和特征为主线的系列研究。本书奉献给读者的正是1995~1996年间环境地球化学国家重点实验室资助客座研究的部分成果,同时也刊出了部分相关研究进展。

二

“碳酸盐岩”、“岩溶”与“喀斯特”是同一事物的不同侧面。在充裕的水-热条件和大气 CO_2 的作用下,碳酸盐岩经溶蚀作用(岩溶)而形成了特殊的自然景观(喀斯特)。由此关系可见,碳酸盐岩是这一个自然演化的基础,岩溶作用是这一自然演化的过程,喀斯特是这一自然演化的结果。溯本求源,碳酸盐岩区域环境的研究宜以碳酸盐岩为基础,既要认识它与水-热-气条件的耦合关系,又要揭示溶蚀作用的地球化学过程,还要评价喀斯特景观与人为影响之间的相互关系。在这一思路下,本书包括如下几个方面的研究进展:

1. 碳酸盐岩的存在是喀斯特景观发育的地质基础 碳酸盐岩的产出和水-气地表营力的溶蚀作用为喀斯特景观的形成提供了基本条件。例如,贵州碳酸盐岩分布面积广、产出厚度大,奠定了喀斯特发育的物质基础。碳酸盐岩与非碳酸盐岩的镶嵌分布,并与特定的构造格局和水热条件结合,构筑了镶嵌特征的喀斯特地球化学景观。从而,对区域表土分布、地下水发育和储藏具有控制作用;对区域生态系统演化和人为活动敏感性产生重要影响。

2. 喀斯特景观的生物地球化学分异 黔中部分地区林地、灌丛石山和农业用地等三种土壤-植被类型采样研究表明：不同植被或土地利用状况对土壤 pH、有机质、全氮含量及 C/N 比等具有明显的影响；碳酸盐岩地区生境独特而又严酷，许多植物具有喜钙、耐旱、耐土薄的特点。五种常见植物的生物地球化学吸收系数和归还系数对比表明，异叶鼠李、火棘对碳酸盐岩地区恶劣的生境有较强的适应能力，是植被恢复的先锋植物。提高石山地区森林植被覆盖率，生态系统微量元素的贮存库将成倍扩大。碳酸盐岩森林发育区生物与土壤相互作用显示森林植被存在很大的恢复潜力。

3. 碳酸盐岩镶嵌景观表土差异性与趋同性 碳酸盐岩上覆的红色土层、非碳酸盐岩风化形成的土层和风化残留物搬运堆积的土层是碳酸盐岩地区常见的表土类型。由于成因类型、物质来源及后生过程的不同，三种景观的土层，在元素的含量组成、垂直分布等方面具有明显的差异：红色土层中 Ca、Mg 淋失，Si、Al、Fe、Mn、K、Na 富集；泥质板岩风化的土层中，Ca、Mg、K、Na 淋失明显；搬运堆积型的土层中，元素的淋失更加强烈， Fe_2O_3 含量更低。镶嵌景观表土的趋同性表现在：泥质板岩和白云岩的化学组成差别很大，但其上覆土层中的化学组成差别并不显著；三种类型表土剖面的上部都有红色层和黄色层，并存在 Si、Al、Fe、Mn 及 Cu、Pb、Zn、Rb、Sr 等微量元素的富集和 Ca、Mg 的淋失。

4. 碳酸盐岩地区土层可能是大气 CO_2 的一个汇 在地-气界面， CO_2 浓度随土层深度的增大而升高， CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，并随土层深度的增加而降低；地-气界面以下土层中， CO_2 含量随土层深度的增大而升高， CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本不变，表明下部土层中 CO_2 具有较稳定的来源。植被类型影响土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，草地土层 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在季节变化。灌丛土层 CO_2 主要来源于植物的根呼吸及土壤有机物的氧化分解；草地土层 CO_2 主要来自于植物根呼吸、土壤有机物氧化分解、土壤微生物活动以及大气扩散输入。模拟计算表明，大气对土层中的 CO_2 有较大的贡献。

5. 碳酸盐岩地区土壤酸化缓冲容量的控制因素 对黔中地区土壤 pH 值、活性酸含量、活性铝含量、氢氧化物含量、盐基总量和 CEC 含量的测定和土壤的酸化缓冲容量及酸化缓冲年限研究表明：土壤酸化缓冲容量的大小顺序为：小金村 > 大榕树 > 普子 > 三塘 > 生态站；土壤的酸化缓冲容量与土壤的 pH 值、CEC、盐基总量呈正相关，与土壤的活性铝、活性酸含量呈负相关，土壤中的氢氧化物与土壤酸化缓冲容量有一定的相关性。

6. 碳酸盐岩地区红土层中氧化铁矿物记录了环境周期性变化 通过新建的红土中氧化铁矿物研究流程，用多种分析手段对红土中氧化铁矿物系统研究表明：红土中针铁矿、赤铁矿和磁赤铁矿等氧化铁矿物沿剖面的分布记录了成土环境周期性变化特征；氧化铁矿物对重金属元素具有富集作用；重金属元素存在化学形态的转化。

7. 碳酸盐岩镶嵌景观中含钾岩石释钾能力受控于酸碱条件 贵州含钾岩石主要为水云母粘土岩和绿豆岩，其主要含钾矿物为伊利石（水云母）。模拟不同 pH 的碳酸水体系中水云母粘土岩的钾溶解释放作用表明：偏酸性的碳酸水体系释钾能力较强，腐殖酸对释钾作用影响不明显；含钾岩石供钾潜力与全钾含量及其它化学组分无明显关系。贵州含钾岩石粉末具有高的土壤供钾潜力，但不同含钾岩石供钾潜力相差很大。

8. 碳酸盐岩区域碳-氮-硫-磷循环的归宿及其沉积记录 洱海深水湖区沉积物柱芯 C_{inorg} 、 C_{org} 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ 、N、S 含量和 P 形态分析结果显示：① C_{total} 、 C_{org} 及 C_{inorg} 具稳定的垂直分布图示， C_{org} 平均占 C_{total} 的 87.9%，其垂直剖面具“沉降-降解-堆积”三阶段分布，

沉降通量为 $12.7\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 堆积通量为 $7.20\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 降解速率常数为 0.017a^{-1} , 寄宿时间为 40a ; C_{inorg} 的堆积通量仅为 $0.62\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。② $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为 $-25.03\text{‰} \sim -28.03\text{‰}$, 变幅仅 3‰ , 指示有机质主要来自陆源植物; 近 460 年间, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 小幅度频繁波动显示汇水区人为活动对植物生产力的明显影响。③ $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ 具同步变化并指示该地区近 700 年气候的“暖-冷-暖”波动。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}/\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ 降低的总趋势显示湖区生物地球化学作用的增强。④ 氮的垂直分布与 C_{org} 相似, 沉降和堆积通量分别为 2.62 、 $1.21\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 降解速率常数为 C_{org} 的 1.4 倍, 寄宿时间仅为 C_{org} 的 $3/4$ 。⑤ 硫在沉积物中显示出较大波动, 沉降和堆积通量分别为 0.73 、 $1.23\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。⑥ P_{org} 、 P_{total} 和 P_{ca} 呈同步变化, 降解图示与 C_{org} 相似; $-P_{\text{org}}$ 的转化导致 P_{inorg} 增高。⑦ C_{org} 及原子比 (C_{org}/N) 随沉积物深度的变化趋势一致, 有机质选择性分解不明显; 堆积阶段 C_{org}/N 为 6.8, 与海洋 Redfield 值相近, 指示沉积物有机质主要来自陆源植物。

9. 从热力学状态场论的最新进展中认识碳酸盐岩区域的环境演化 热力学作为宏观科学的理论基础, 是由微观科学体系通往宏观科学领域的桥梁。为此, 我们特邀中国科技大学离休一级教授刘叔仪先生主笔介绍他在热力学状态场论研究中的最新进展, 以期在碳酸盐岩环境演化的理论上获得新的开拓。

10. 顺应碳酸盐岩区域环境的脆弱性特点, 寻求环境建设途径 碳酸盐岩区域地球化学敏感性和生态环境脆弱性集中体现在水和土两个方面: 水作为环境物质的溶液、溶剂和载体, 在喀斯特生态环境演化及地球化学过程中处于“焦点”地位; 碳酸盐岩区域成土难、保土更难, 土是喀斯特环境系统的“关键”因素。碳酸盐岩区域环境演化在很大程度上是一个长期地质过程, 其环境观测面临全球、区域和局地三个层次的任务。“上保、中治、下开发”、“城乡环境一体化建设”和“资源环境有效性”是碳酸盐岩区域环境建设的重要途径。

三

本项研究的开展和专著的出版获得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的资助。但是, 科学研究总是在一个大系统中进行, 因而其中各部分研究内容与若干项国家自然科学基金项目和国家其他科学研究项目存在着密切的必然联系。所以, 在一定程度上获得了相关项目的支持。这些项目中包括:

国家自然科学基金重点项目: 云贵高原湖泊现代沉积地球化学过程及环境信息的辨识与提取 (项目编号: 49333040, 主持人: 万国江);

国家自然科学基金重大项目专题: 西南季风短尺度波动与湖泊沉积 (项目编号: 49894170, 主持人: 万国江);

国家自然科学基金地区基金项目: 贵州岩溶环境中红土风化机理及其地球化学敏感性研究 (项目编号: 49463011, 主持人: 朱立军);

国家自然科学基金青年基金项目: 碳酸盐岩地区湖泊 CO_2 来源的 ^{13}C 、 ^{14}C 同位素示踪 (项目编号: 499903007, 主持人: 王仕禄);

中国科学院“九五”重大项目专题: 云南程海人与自然相互作用的湖泊记录 (项目编号: KZ951-A1-402-06-04, 主持人: 万国江);

中国博士后基金项目: 岩溶地区土壤中 CO_2 动力学与环境效应研究 (主持人: 郑乐平)。

感谢刘东生教授为本书热情作序！

前言由万国江执笔；每篇文稿的作者已经在文章中注明；万国江、王仕禄负责了成书的统稿工作。

为更多地保持各篇文稿的特色，本卷中仍按单篇文章编排，但尽可能地兼顾到本书主题内容的一体性。

笔者要向参与研究的实验室分析人员致以衷心的感谢！他们中有：黄荣贵高级实验师、周竞业工程师、袁芷云高级工程师、朴河春研究员、曾毅强研究员、安宁研究实习员等。他们的辛勤劳动为本书的撰写提供了重要依据。

笔者还要感谢陈业材研究员、李斌和顾复等同志。他们在实验室客座学者工作生活的安排、野外交通保证等方面给予了很好配合。

陈敬安博士和罗莎莎博士参与了部分资料的整理和成书的校改工作；黄万才高级工程师参与了部分图件的清绘。谨此一并致谢！

此外，中国科学院地球化学研究所前任领导谢鸿森研究员、李加田研究员，本届领导刘丛强研究员、胡瑞忠研究员，科研处王兴理高级工程师及有关部门同志对本项研究的实施给予了很大的帮助，谨此一并致谢！

由于时间仓促，书中不妥之处，恳望读者批评指正。

万国江

1999.12.31

卷一前言 (节录)

十年前，我们完成了《京津渤区域环境综合研究》。作为国家重点科研项目，其宗旨是选择北京—天津—渤海湾（简称京津渤）这样一个兼顾自然环境格局和人为环境影响的典型区域，针对其区域内的环境功能特点和区域性的环境质量问题，在较大的时空尺度下开展多层次和多学科的综合研究，以期从区域整体上寻求控制和改善环境质量的科学途径。作为我国大区域环境综合研究的首次完成，该项研究在环境功能特征、环境质量规律、环境控制方案、环境改善途径、环境规划对策及区域环境理论方法等诸多方面取得了兼具基础性、系统性、综合性和实用性的丰硕成果（参见万国江主编：《京津渤区域环境演化、开发与保护途径》，科学出版社，1989年版），获得了国家的重奖。自那以后，我们便试图寻求开拓另一类型的区域环境研究，即一种特定地质环境背景上的区域环境演化和耦联环境问题的系统、综合研究。

五年前，我们完成了《西南经济发展的环境战略研究》。该项研究作为国务院委托中国科学院组织实施的《西南地区资源开发与发展战略研究》中总体研究的组成部分，着重于区域内资源开发和经济发展中环境质量恶化的研究，以期在资源开发利用与经济协调发展中寻求环境质量控制战略途径。其间，对碳酸盐岩区域环境性质的认识获得了很好的深化：碳酸盐岩区域的梯级格局继承了地质历史演化；碳酸盐岩区域的复杂水气流场控制环境物质输送；碳酸盐岩区域的岩石土层性质诱发了生态环境问题（万国江等：贵州省资源开发中的环境战略分析，《西南资源开发考察研究材料》0118号，中国科学院西南资源开发考察队，1988年1月）。在此基础上，提出了碳酸盐岩区域“生态环境脆弱性和地球环境敏感性”问题（参见万国江等主编：《西南经济发展的环境战略研究》，科学出版社，1991年版），将其生态环境脆弱与地球化学敏感问题关联起来。

近百年以来，碳酸盐岩区域复杂的溶蚀作用和千姿百态的自然景观已为人们所关注；“喀斯特”（karst）一词自亚德里亚海边的第纳尔“kars”（斯洛文尼亚语“石头”之意）高原发端；喀斯特认识和研究工作一直与农灌、工程、洞穴、矿产等诸多实际问题联系。碳酸盐岩区域的物理、化学和生物作用派生出水资源利用、地质工程、土质贫脊、水土流失、化学元素溶蚀和生物资源保护等一系列环境问题。而这些环境问题又直接影响到碳酸盐岩区域的社会进步、经济发展、人类生存及人群健康。同时，碳酸盐岩出露的区域又具有特殊的资源潜力。矿产资源、旅游资源、生物资源等都具有特殊的价值。

有鉴于此，近20多年来，地质、地理、土壤、水文、生物、生态、农林、气象、水利及相关工程领域的学者专家都在为之努力，以谋求碳酸盐岩区域资源利用和环境改善的持续发展途径。

在此，不妨列出一个时间表：

1973年，H. E. Legrand 提出喀斯特区域的水文和生态问题；

1983年5月，美国科学促进会149届年会安排了“喀斯特环境问题”专题讨论，并将喀

斯特环境列为一种脆弱的环境；

1983年9月，贵州环境科学学会召开“贵州喀斯特环境问题”学术讨论会；

1984年，国际地理联合会（IGU）设立“人类对喀斯特环境的影响”研究组；

1988年5月，袁道先、蔡桂鸿出版“岩溶环境学”；

1988年8月，贵州环境科学学会出版《贵州喀斯特环境研究》论文集，并于9月召开贵州第二次喀斯特环境学术研讨会；

1988年，国际水文地质协会召开第21届大会，主题为“岩溶水文地质和岩溶环境保护”；

1992年5月，朱成松等出版了《贵州岩溶地区农村经济开发研究》；

1992年，中国地理学会召开“第三届全国喀斯特地貌与洞穴学术讨论会”；

1992年，贵州省科学技术协会召开“贵州喀斯特地区农业发展学术讨论会”；

1992年，中国科学技术协会召开“全国喀斯特地区农业发展学术讨论会”；

1994年，中国地理学会召开“喀斯特与洞穴风景旅游资源开发与保护国际学术讨论会”；

1994年，杨汉奎等出版了《喀斯特环境质量变异》等。

以上所列，挂一漏万。凡此等等足见这一研究领域的活跃气氛；但也预示出这一领域的基础研究和应用技术将会获得进一步的加强和深入。

认识碳酸盐岩区域环境的地质、地球化学和生物地球化学过程的特点，揭示其基本规律必将有助于这类区域环境质量问题的解决，有助于促进该类区域的经济振兴和社会进步，有助于提高人民生活质量和维护群众身体健康。

三

本书作为《碳酸盐岩与环境》系统研究的第一卷，着重论述了如下问题：

(1) 碳酸盐岩区域的地球化学作用与碳酸盐矿物、水及大气 CO_2 之间的作用紧密相关，表层岩溶带与相邻圈层的碳循环相互影响。碳酸盐岩区域侵蚀作用强烈。对碳酸盐岩地区侵蚀作用的科学认识有利于揭示区域环境质量的演化，有利于调控生态系统的结构功能，有利于评估其全球变化意义。碳酸盐岩侵蚀作用是一个全球时空尺度下的地质过程。贵州碳酸盐岩区域的特殊地理位置、梯级格局和镶嵌景观，决定了其侵蚀作用过程的研究具典型意义。

(2) 碳酸盐岩区域地表植被类型的差异，岩溶地球化学过程复杂多变。常见的生境类型有原始岩溶森林区、人工林区、灌木林区、草本层覆盖区、石漠化区以及岩溶沉降区。不同生境下，土层有机碳和无机碳的含量分布变化很大。同时，土层中 CO_2 的产生量差别也很大，低者仅 500×10^{-6} (v)，高者可达 1.7×10^{-2} (v)。其由高而低的顺序是：灌木林区、原始岩溶森林区、草本区、石山区。生境条件对土层 CO_2 含量的控制可能主要受微生物作用的制约；而土层结构、气温、降水等条件对土层中 CO_2 的产出、淋失、逸散都可能产生较大影响。

(3) 碳酸盐岩区域侵蚀以化学侵蚀为主，物理侵蚀为次。碳酸盐岩的化学侵蚀与侵蚀后过程既制约了碳酸盐岩区域水化学组成的不稳定性，又存在与大气二氧化碳的耗损与逸散平衡。碳酸盐岩区域物理侵蚀速率虽小，但却导致区域土层处于负增长状态，促成了岩体裸露石山化趋势。区域石山荒漠化与岩性特点、地貌类型、降水条件、土地利用等众多因素相关。宇宙线产生的短寿命核素 ^7Be 提供了示踪土粒季节性侵蚀的可能。示踪研究结果表明碳酸盐岩山坡上部为严重侵蚀区，侵蚀速率为流域平均侵蚀速率的 1.3×10^2 倍；夏秋季较春冬季侵

蚀强度大 20%~30%；冬春季土粒侵蚀位移距离小，在低洼部位堆积，而夏秋季位移距离增大，土粒可能进入下游水体。

(4) 碳酸盐岩上红色风化壳演化特征的认识是揭示其地球化学敏感性和生态环境脆弱性的重要方面。用扫描电镜、红外光谱、X 射线衍射等多种分析手段研究表明：高岭石和 0.7nm 埃洛石是红色风化壳主要粘土矿物。粘土矿物组合随成土环境和风化强度在剖面中呈规律变化。通过常量、微量及稀土元素分布研究表明：红色风化壳演化经历了三个成土地球化学过程：富硅铝脱钙镁过程、富铁锰过程及富铝硅过程。

(5) 为证实碳酸盐岩风化过程的酸控制因素，通过三种合成雨水的模拟实验表明：“现代空气雨水”($\text{pH}=5.75$) 有利于碳酸盐类矿物的溶蚀；而“饱和 CO_2 雨水”($\text{pH}=4.80$) 的溶蚀作用与前者相比，反而存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 带出量降低的趋势；但“酸化雨水”($\text{pH}=3.5$) 的溶蚀作用较前者增高 1~2 倍。

(6) 碳酸盐岩上覆土壤的酸化敏感性与其生态脆弱问题密切相关，特别对酸沉降区更具现实意义。对白云岩与石灰岩上覆黄壤的淋溶模拟实验证实了土壤中残留含钙矿物的不断溶解构成了对酸化的缓冲作用，从而降低土壤对酸化的敏感性；但两种类型黄壤不仅在 pH 值上有差别，而且含有一定潜性酸，从而导致二者的酸化敏感性差异很大。研究结果还表明：金属元素对两种黄壤酸化的敏感性顺序也具很大差别。对盐基离子而言，清镇黄壤为 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ ；而遵义黄壤为 $\text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ ；对微量元素而言，清镇黄壤为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Fe} > \text{Mn}$ ；而遵义黄壤为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Cd} > \text{Fe}$ 。

(7) 遥感信息的使用可能为揭示碳酸盐岩区域环境变化提供新的思路。通过对区域内主要地物遥感光谱特征的分析可知：碳酸盐岩的光谱特征大体相同，但在反射率上，钙华 > 白云岩 > 灰岩；由于土壤有机质含量差异，在反射率上，表层耕土 > 草甸土 > 水稻土；各类植物光谱特征相似，反射率差别为：草本 > 苔藓；从 TM 波段反射率与叶绿素含量相关性分析，反映碳酸盐岩区域植物生理和生态状况的较好指标是 TM5/7、TM5/4、TM2/1 以及 TM2/3。

四

本领域的研究中常用到“喀斯特”、“岩溶”及“碳酸盐岩”三个专有名词。三者在某种程度上同义；但究其词源和定义又略有差别，好似一事物的不同侧面。鉴于环境问题的发生和发展，环境质量的演化和变异都是以环境物质作基础，本书中较多地使用“碳酸盐岩”一词。但为叙述方便，有时也用“岩溶”或“喀斯特”。

限于研究进展，本书只涉及有限的几个问题。好在这个领域的研究工作还在继续和深入，我们将出版第二卷、第三卷……。环境地球化学国家重点实验室（1994~1995 年度）的客座研究计划已经实施，可望在这一领域取得新的进展！特别可喜的是国家自然科学基金委员会已将本类选题列为地球科学部“九五”优先资助领域。

碳酸盐岩区域环境领域的许多问题，在不同学科中尚未取得完全一致的见解。随着研究工作的深入，将会逐步取得共识。作为多学科的系统研究，论著中存在不同的看法是自然的。因此，我们在成书时，一方面重视章节之间的内容联系和交叉衔接；另一方面尊重各章执笔者的学科特色。“鱼”和“熊掌”皆为吾欲，盼兼而得之。

目 录

序

前言

卷一前言 (节录)

喀斯特区域脆弱性及环境对策	万国江 (1)
喀斯特景观发育的地质基础——以贵州地区为例	陈履安 万国江 (7)
贵州中部碳酸盐岩地区景观地球化学特征	李秀珍 肖笃宁 万国江 (16)
碳酸盐岩地区镶嵌景观表土的地球化学特征	王仕禄 邵树勋 万国江 (28)
碳酸盐岩地区表土层中的 CO ₂	郑乐平 万国江 (38)
碳酸盐岩地区土壤酸化缓冲容量	冯建斌 戴昭华 孙建中 (58)
贵州碳酸盐岩红土中氧化铁矿物及其环境意义	朱立军 万国江 (66)
贵州含钾岩石水-岩作用和供钾潜力研究	陈履安 陈业材 陈敬安 (75)
碳酸盐岩地区湖泊近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录——以洱海为例	万国江 白占国 黄荣贵 王浩然 唐德贵 肖保华 (87)
含耦合律(LOC)的非经典(N-C)热力学状态场论(S-F. TOT):	
(N-C. S-F. TOT)⊃(LOC), (1) 新创热力学第二定律, 耦合律(LOC)分支论	
	刘叔仪 万国江 王仲仁 王美英(109)

CONTENTS

Preface

Foreword

Foreword of Vol. 1(A part)

Study on frangibility of karst and its environmental countermeasures

..... Wan Guojiang(1)

Geological background of karst landscape:An example from Guizhou Province

..... Chen Lu'an and Wan Guojiang(7)

Landscape geochemistry in the carbonate rock region,central Guizhou

..... Li Xiuzhen,Xiao Du'ning and Wan Guojiang(16)

Geochemical characteristics of surface soils in the carbonate rock region

with a mosaic landscape Wang Shilu,Shao Shuxun and Wan Guojiang(28)

CO₂ in surface soils in the carbonate rock region

..... Zheng Leping and Wan Guojiang(38)

Buffer capacity of soil acidification in the carbonate rock region

..... Feng Jianbin, Dai Zhaohua and Sun Jianzhong(58)

Environmental significance of iron oxide minerals from the laterite developed

on the carbonate rock in Guizhou Zhu Lijun and Wan Guojiang(66)

Water-rock reactions of rocks containing K and their potentials of supplying K

..... Chen Lu'an,Chen Yecai and Chen Jing'an(75)

Geochemical records of C,N,S,P in recent sediments in the carbonate rock region:An

example from Lake Erhai Wan Guojiang,Bai Zhan'guo,Huang Ronggui,

Wang Haoran,Tang Degui and Xiao Baohua(87)

Non-classical(N-C)state-field theory of thermodynamics(S-F. TOT) including

A New Second Law of Thermodynamics,the Law of Coupling(LOC):

(N-C. S-F. TOT)⊃(LOC), (I) ramification of the non—classical law of

coupling(LOC) Liu Shuyi,Wan Guojiang,Wang Zhongren and Wang Meiyang(109)

喀斯特区域脆弱性及环境对策

万国江

(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 贵阳 550002)

提要:碳酸盐岩的存在是喀斯特形成的地质基础;水溶蚀作用是形成喀斯特的必要前提。喀斯特地区存在水资源利用、地质工程、土质贫瘠、水土流失、化学溶蚀、初级生产力低下和生物资源保护等一系列生态环境问题。同时,喀斯特地区碳酸盐岩与水体、大气、生物之间的碳交换作用在碳的地质和生物地球化学循环中具典型性;在全球气候变化温室效应气体 CO_2 的“源”、“汇”认识中具特殊意义。由于地质构造格局和喀斯特形成演化过程所制约,大部分喀斯特发育在山区,其地球化学敏感性和生态环境脆弱性集中体现在水和土两个方面。喀斯特形成于碳酸盐矿物的水化学动力反应,水质呈现出重碳酸盐钙组Ⅱ型($[\text{C}]\text{CaⅡ}$)水的总体特征。水作为环境物质的溶液、溶剂和载体,在喀斯特生态环境演化及地球化学过程中处于“焦点”地位。碳酸盐岩地区土层浅薄、土质贫瘠;碳酸盐岩中可溶盐矿物占90%以上。喀斯特地区成土难、保土更难。土是喀斯特地区环境生态系统的关键因素。喀斯特区域环境演化在很大程度上是一个长期地质过程,其环境观测面临全球、区域和局地三个层次的任务。“上保、中治、下开发”、“城乡环境一体化建设”和“资源环境有效性”是喀斯特山区生态环境建设的重要战略途径。

关键词:喀斯特环境演化 水是焦点 土是关键

1. 喀斯特山区地球化学敏感性及其生态环境脆弱性

“喀斯特”(Karst)一词源于亚德里亚海边的第纳尔“Kars”高原(“Kars”在斯洛文尼亚语中系“石头”之意);喀斯特作为科学术语,系指碳酸盐岩经复杂的溶蚀作用并形成千姿百态的自然景观。由喀斯特的词源和词意可以看出其内涵及外延是(万国江等,1995):

- 碳酸盐岩的存在是喀斯特形成的地质基础;
- 水溶蚀地球化学作用是形成喀斯特的必要前提条件;
- 水与碳酸盐矿物岩石相互作用的不均一性制约了喀斯特地区的景观特征、环境条件、生态类型及元素聚集和迁移;
- 喀斯特地区在水源、垦植、工程、矿业等诸多实际问题方面具特殊性;
- 喀斯特地区存在着水资源利用、地质工程、土质贫瘠、水土流失、化学溶蚀、初级生产力低下和生物资源保护等一系列生态环境问题;
- 碳酸盐岩与水体、大气、生物之间的碳交换作用在碳的地质循环和生物地球化学循环

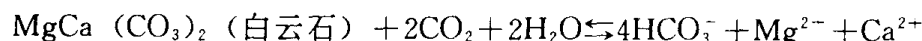
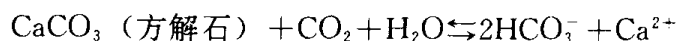
中具典型性；在全球气候变化温室效应气体 CO_2 的“源”、“汇”认识中具特殊意义。

由于地质构造格局和喀斯特形成演化过程所制约，大部分喀斯特发育在山区。山区，特别是边远山区，虽然受人为活动的直接干扰较少，但在当今人类活动已在全球尺度上影响地球环境的时代背景下，边远山区仍被大气污染、酸沉降及气候变化所影响 (Wathne, 1996)。山区陆生生态系统对氮沉降吸收少，水体硝酸盐含量高、酸中和能力弱；山区土壤及河湖沉积物中有害微量金属和有机物容易积累；污染物的全球性扩散散落及全球性气候变化在山区的响应明显。

鉴于喀斯特山区的上述背景特征，其地球化学敏感性和生态环境脆弱性集中体现在：水和土两个方面。

2. 水是喀斯特山区环境过程的焦点

喀斯特形成于碳酸盐矿物的水化学动力反应：



上述反应能在常温常压下有效地进行，并具有可逆性。该可逆反应不仅控制着碳酸盐矿物的溶蚀，而且还制约了碳酸盐矿物的沉淀。

溶蚀反应与沉淀反应双向进行的结果，一方面塑造了碳酸盐岩区域新的溶蚀构造和景观格局；另一方面控制着碳酸盐岩地区的水化学组成特征；再一方面还维系着大气 CO_2 与碳酸盐矿物间的平衡关系 (万国江, 1995)。

喀斯特溶蚀结构和景观格局的形成使得其水文地质条件更加复杂，地面水与地下水系统直接相互连通。因而，喀斯特地区保水、蓄水的难度很大，进入水体的污染物可能形成持续性的污染。

喀斯特地区的水质呈现出重碳酸盐钙组Ⅱ型 ([C] CaⅡ) 水的总体特征。由于溶蚀-沉淀作用的交替可逆进行，喀斯特地区水化学组成极不稳定 (Bai and Wan, 1998)。碳酸盐岩裂隙水进入地表层，碱度升高、 HCO_3^- 降低、碱金属离子浓度升高；地面水搬运过程中， NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 等主要水质成分呈现出升高的趋势；由于人为活动的影响，大气 CO_2 浓度升高、酸性沉降物 (NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 增多，致使喀斯特地区的水化学组成特征更为复杂。

碳酸盐类矿物地球化学风化溶蚀是消耗大气 CO_2 的过程；而溶蚀后的碳酸盐类矿物沉积又将向大气释放 CO_2 。消耗与逸散平衡的结果，喀斯特地区仍具备大气 CO_2 “汇”的特征。例如，贵州红枫湖汇水面积 1551km^2 ，年输送水量 $1.13 \times 10^9\text{m}^3$ 。根据红枫湖水矿物化学平衡计算结果，每年从大气消耗 CO_2 约为 $6.4 \times 10^8\text{mol}$ (万国江等, 1995)。由此可见，喀斯特地区 CO_2 平衡关系既具有碳的地质循环意义；又在现代碳的生物地球化学循环和全球温室气体变化中占具特殊的份额。

以上分析可见：水作为环境物质的溶液、溶剂和载体，在喀斯特生态环境演化及地球化学过程中处于“焦点”地位。

3. 土是喀斯特山区环境演化的关键

土壤是陆地生态系统的基础。碳酸盐岩地区土层浅薄、土质贫瘠。特别是水土流失严重地区,生态系统脆弱,呈现出石山荒漠化的趋势。

碳酸盐岩物质组成中,碳酸盐类矿物组分占90%以上。黔中地区三叠系白云岩或灰岩中,碳酸盐类可溶性矿物组成约为95%左右;其岩石化学风化速率约为 $0.017\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,即溶蚀后的残留物生成速率小于 $0.001\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而该地区表层土粒(固体颗粒物)物理侵蚀速率约达 $0.003\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由此可见,碳酸盐矿物溶蚀后残留物的生成速率仅为物理侵蚀速率的1/3左右。从客观而论,黔中地区表层土粒处于负增长状态(万国江等,1995)。当然,从另一方面看,碳酸盐岩层中镶嵌的非碳酸盐类矿物的风化可能提供较多的残留物,以维系着宏观整体上物理侵蚀的补偿关系(刘东生等,1985;杨明德,1988;卢耀如,1986)。

根据黔中碳酸盐岩地区表土侵蚀作用的 ^7Be 示踪研究可知:表土侵蚀受微地形地貌的影响,具有显著的随季节性降水而变化的特征;被侵蚀的大部分土粒经短距离位移,在低洼部位堆积(白占国和万国江,1998)。

上述分析说明:

- 喀斯特地区成土难,保土更难;
 - 喀斯特区域环境演化在很大程度上是一个长期地质过程;
 - 如果没有喀斯特石山上部的土粒侵蚀,也更难存在石山洼部的土层堆积;
 - 正是峡谷、低洼部位的残土堆积,才维系了喀斯特山区脆弱的生态系统的繁衍。
- 总之,土是喀斯特地区环境生态系统的因素。

4. 喀斯特山区环境观测面临全球、区域和局地三个层次的任务

从全球尺度上看,喀斯特地区水与碳酸盐岩相互作用是维系大气 CO_2 平衡关系的一个重要方面。碳酸盐岩石不仅是一个重要的“碳库”,而且溶蚀-沉积作用又使喀斯特地区成为大气 CO_2 的一个特殊“碳汇”。特别是矿物燃料燃烧导致全球性大气 CO_2 浓度增高的现代地球环境条件下,观测和认识喀斯特地区碳酸盐矿物的这种溶蚀-沉积平衡关系必将更有利于大气温室气体变化及其环境效应的评价。与大气中 CO_2 浓度增加的同时,N、S氧化物酸性气体在山区的散落沉降加剧,也必将对碳酸盐矿物溶蚀与沉积过程发生重要影响(万国江,1988;袁道先,1993;Stumm and Morgan, 1981; Suchet and Probst, 1993)。因此,从全球变化层次上说,喀斯特山区生态环境观测的任务是提供碳地质循环及其受近代人类经济社会活动影响的典型实例。

从区域尺度上看,喀斯特山区在矿产资源、水资源、生物资源、旅游资源等方面具有特殊的优势;但喀斯特山区又在水土流失、土地利用、地质工程、资源开发、生态破坏等方面存在着严重的环境问题(周汝鑫,1988;屠玉麟,1988;杨明德等,1988;杨汉奎等,1994)。因此,很有必要从喀斯特集中分布区的区域整体上认识其区域内部生态环境系统各子系统和各要素之间的关系;认识与其相关连的非喀斯特区域的生态环境系统间的物质和能量交换关系;认识其生态环境系统与区域经济社会协调持续发展的制约关系。

我国华南地区是世界喀斯特最集中发育的地区之一。黔中地区又是华南喀斯特发育区域的中心部位。观测和研究黔中喀斯特山区生态环境系统的生物地球化学物质循环具有典型价值；同时，对该区域受损生态环境的复苏、资源开发利用及经济社会协调发展具很大的实际意义（龚子同，1983；杨汉奎，1988）。

区域性的观测宜以积水盆地对象。从湖泊（水库）及其汇水区的物质输送出发可能获得良好的效果。黔中红枫湖及其汇水区构成了很有价值的喀斯特生态环境观测研究区域。

局地生态环境是构成环境区域的基本单元。同属喀斯特的不同局地生态环境可能呈现出截然不同的生态景观类型；表征出不同的经济社会发展可适性。从局地空间尺度上观测和认识不同喀斯特类型区间的共性和差异必将有利于局地受损生态环境单元的复苏。

5. 喀斯特山区生态环境建设的战略途径

鉴于喀斯特山区的背景特征，其生态环境建设宜采取“上保、中治、下开发”、“城乡环境一体化”、“物质循环有效性”三个方面的对策。

5.1 上保、中治、下开发

“上”、“中”、“下”分别是相对性的空间分区概念。从一个流域看，可以是“上游”、“中游”、“下游”；从一个局地看，可以是“山上”、“山中（腰）”、“山下”。

在京津渤区域环境研究中，根据区域环境物质输送关系，人类开发活动及其环境影响效应，我们曾建议：“上游山区以保护为主”、“中部平原地区以治理为主”、“下游渤海湾地区有更大的开发潜力”（京津渤区域环境综合研究组，1989）。

在西南经济发展与环境建设的研究中，根据流域经济发展和生态环境建设的需要，我们曾建议：干流上游和支流上游应该保土、保水；流域中部及其分布的大中城市宜从整治中求发展；下游地段可充分利用腹地的资源优势 and 自身的环境潜力，求得经济社会与环境建设的同步发展（万国江、蒲汉昕，1991）。

对局地喀斯特环境类型而言，“上保、中治、下开发”也具相应的内涵。贵州毕节地区在整治山区生态环境时，曾实施“山顶戴帽子、山腰系带子、山脚铺被子”的对策，与“上保、中治、下开发”的构思一致。

5.2 城乡环境一体化

根据我国西南地区城市和乡村环境恶化的严峻形式和环境质量问题的特点，我们曾建议，针对城市和乡村不同的侧重点实施城乡环境建设一体化的构想（万国江、蒲汉昕，1991）。对于喀斯特山区而言，实施这一构想更显必要。

喀斯特山区城市主要分布于山间盆地或溶盆洼地，城市大气污染物扩散能力低；水体污染物易于进入岩溶地下水系统，并通过岩溶裂隙管道而扩散；喀斯特山地生态系统对城市生态系统的养护能力低；对大气污染物的净化能力弱。为改善喀斯特山区生态环境，既要增强城市自身的环境控制功能，又必须增强乡村生态系统的稳定性和调节功能。喀斯特山区实施城乡环境一体化建设势在必行。

搞好环境规划是喀斯特山区实施城乡环境一体化建设的首要前提。考虑到喀斯特山区地