

碳酸盐岩风化成土作用 及其环境效应

朱立军 李景阳 著

地质出版社

碳酸盐岩风化成土作用 及其环境效应

朱立军 李景阳 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

碳酸盐岩风化成土作用是岩溶环境中最基本和最常见的地质地球化学作用。本书集作者十余年来对中国南方碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应进行研究的成果,系统详细介绍了碳酸盐岩红色风化壳地质地球化学特征,重点阐述了碳酸盐岩风化成土作用和机理、风化成土地球化学过程及环境效应,提出并论证了碳酸盐岩风化成土作用演化的富硅铝脱钙镁、富铁锰和富铝脱硅三阶段地球化学过程,创立了碳酸盐岩红色风化壳形成的交代成土成因观点,初步构建起碳酸盐岩风化成土作用的理论框架;运用环境磁测、XPS、TEM、SEM、吸附实验等技术和方法,详细研究了针铁矿、赤铁矿和方解石等矿物表面化学特征及岩溶环境中氟、砷污染的矿物学机制,探讨了碳酸盐岩风化成土作用的环境效应。

本书是目前国内外第一部系统讨论碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应的专著,内容丰富、图文并茂,适合于地质、土壤、岩溶环境、环境矿物学、环境地球化学等方面科研人员及院校师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应/朱立军,李景
阳著. —北京:地质出版社,2004.11
ISBN 7-116-04282-2

I. 碳... II. ①朱...②李... III. 碳酸盐岩—风化
(化学)—岩成土—研究 IV. P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 124213 号

责任编辑:郝杰 王璞

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部);(010) 82324572 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:9 图版:5 页

字 数:202 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2004 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价:25.00 元

ISBN 7-116-04282-2/P·2531

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

序

碳酸盐岩风化成土作用是碳酸盐岩地区最基本和最常见的地质地球化学作用，也是岩溶环境中岩—土—水—大气—生物相互作用的主要形式和元素表生地球化学循环的关键环节。系统开展碳酸盐岩风化成土作用机理的研究，不仅是深刻认识并切实解决岩溶地区水土流失、石漠化、土壤和水体污染、酸雨侵蚀、土壤退化等一系列环境问题的理论基础，而且是国际岩溶学研究的热点和岩溶环境学研究的前沿领域。

由朱立军教授、李景阳教授及其研究群体历时十年完成的学术专著——《碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应》，在以下方面取得突破和进展：①系统阐明了碳酸盐岩红色风化壳地质地球化学特征，重点研究了碳酸盐岩风化成土作用和机理、风化成土地球化学过程及环境效应；②首次提出并论证了碳酸盐岩风化成土作用演化的“富硅铝脱钙镁、富铁锰和富铝脱硅”三阶段地球化学过程，创立了碳酸盐岩红色风化壳形成的交代成土成因观点；③系统研究了针铁矿、赤铁矿和方解石等矿物表面化学特征及岩溶环境中氟、砷污染的矿物学机制，并探讨了碳酸盐岩风化成土作用的环境效应；④初步构建起碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应的理论框架。这些创新性成果，不仅进一步丰富了岩溶环境学研究的内容，而且开创了以微观机理带动宏观环境效应研究的新途径。

朱立军教授是我国第一位环境矿物学博士，他1995年博士毕业至今，受国家自然科学基金等项目持续资助，一直从事本专著相关内容的研究；李景阳教授长期从事岩溶环境学的教学和科研，是我国岩溶环境学研究领域的知名学者。可以说，本专著既是以朱立军教授和李景阳教授为学术带头人的研究群体十年科研成果的全面总结，也是他们孜孜不倦的进取精神和持之以恒的奋斗精神的真实写照。

相信本专著的出版，不仅能对表生地球化学和岩溶环境学的发展有重要推动作用，而且能对碳酸盐岩区的环境综合治理工程有所裨益。特向读者推荐，是为序。

中国科学院院士

李景阳 自述

2004年7月13日

前 言

碳酸盐岩风化成土作用是碳酸盐岩地区最基本和最常见的地质地球化学作用，也是岩溶环境中岩—土—水—大气—生物相互作用的主要形式和元素表生地球化学循环的关键环节。它制约着岩溶环境中岩—土—水—大气—生物系统的地球化学组成和物质、能量传输过程，记录着气候和环境变化的信息，与碳酸盐岩地区一系列资源与环境问题密切相关。全球碳酸盐岩出露面积约占陆地面积的 12%，居住着约十亿人口。我国碳酸盐岩分布面积达 $344 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占国土面积的 1/3，其中碳酸盐岩出露面积达 $90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上，接近国土面积的 1/10。中国南方碳酸盐岩分布区是全球连片分布、面积最大的碳酸盐岩分布区，地处东南亚碳酸盐岩分布区域中心地带，化学风化和成土作用强烈，形成了独特的岩溶地质地貌景观，广泛发育碳酸盐岩红色风化壳，具有突出的地球化学敏感性和生态环境脆弱性特征，在全球亚热带岩溶地区中具有代表性和典型性。碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应的研究，对解决碳酸盐岩地区一系列资源环境问题具有十分重要的科学意义和现实意义。长期以来，受到世界各国科学家们的关注，特别是我国的科学家们，充分利用我国南方岩溶地区在全球岩溶环境中所处的地域优势，发挥多学科综合研究的学术优势，使我国碳酸盐岩风化作用—岩溶作用及其环境效应研究一直处于国际学科前沿和领先地位。但值得注意的是，前人工作的重点主要集中在碳酸盐岩风化作用—岩溶作用及其环境效应方面，而碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应研究就显得相当薄弱，这在很大程度上也制约了碳酸盐岩地区一系列资源与环境问题的深入研究。本书是作者十余年来对中国南方碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应研究的系统总结，部分成果已在国内外一些学术刊物上发表，引起了国内外有关学者的极大关注，并被大量引用。

全书共分八章。第一章“碳酸盐岩红色风化壳剖面特征”，系统详细地介绍了碳酸盐岩红色风化壳的地质地球化学特征，剖面分层分带情况及岩土界面特征；第二章碳酸盐岩红色风化壳结构和构造，讨论了红色风化壳结构和构造的概念，提出运用结构—构造成因观点和理论来认识和探讨红色风化壳结构和构造，总结归纳了红色风化壳主要的结构构造特征，系统论述了红色风化壳微结构特征，重点介绍了溶滤层的微结构特征；第三章“碳酸盐岩红色风化壳矿物特征及其环境意义”，运用环境矿物学理论和现代矿物学方法，详细介绍了红色风化壳中粘土矿物、石英、三水铝石和氧化铁矿物特征，设计

并建立起一套较完整的红色风化壳中细粒超细粒氧化铁矿物样品制备和分析流程,探讨了粘土矿物和氧化铁矿物的环境意义;第四章“碳酸盐岩红色风化壳磁学性质及其发生机理”,根据对碳酸盐岩红色风化壳剖面8个磁学参数的系统测定,讨论了红色风化壳磁学参数—氧化铁矿物—微量元素之间的相关关系以及磁性氧化铁矿物与微量元素空间分布特征和富集规律,成功地从红色风化壳中提取到较纯的磁赤铁矿微结核,探讨了红色风化壳磁学性质的发生机理;第五章“碳酸盐岩风化成土地球化学过程”,讨论了碳酸盐岩风化成土过程中主量元素、微量元素和稀土元素的地球化学行为和演化过程,结合淋滤实验和因子分析,系统论述了碳酸盐岩风化成土作用演化的富硅铝脱钙镁、富铁锰和富铝脱硅三阶段的地球化学演化过程;第六章“碳酸盐岩风化成土作用及机理”,介绍了碳酸盐岩现代风化壳与古风化壳的特点及红色风化壳系统、结构、功能和作用,详细讨论了岩溶水作用、溶蚀作用、交代作用、淀积作用及充填作用,重点论述了交代成土作用的特点及机理,探讨了岩土界面的方解石表面化学特征及其反应机理、红色风化壳中粘土矿物和氧化铁矿物的成因及演化,提出并论证了交代成土作用是起主导作用的碳酸盐岩风化成土作用并贯穿于碳酸盐岩红色风化壳形成和演化全过程的交代成土成因观点;第七章“碳酸盐岩风化成土作用的环境效应”,讨论了风化成土作用对红色风化壳中重金属元素迁移富集和化学形态的影响,通过氧化铁矿物表面化学分析和吸附实验,讨论了岩溶地区岩土水系统中氟的环境地球化学以及氟、砷污染的矿物学机制;第八章“主要研究进展与展望”,总结了本项目在研究红色风化壳粘土矿物和氧化铁矿物成因及其环境意义、红色风化壳磁学性质及其发生机理、碳酸盐岩风化成土作用及其机理、地球化学过程以及环境效应等方面的主要进展和科学意义,展望了今后若干年碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应研究将迅速发展的若干领域。本书附有大量图片资料和作者发表的相关论文目录。

从20世纪90年代初开始进行的碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应研究,得到了国家自然科学基金项目(49463011、49833002和49962002)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(1993年度、1995年度)、贵州省跨世纪科技人才工程项目(2000~2004)以及贵州省科学基金项目的持续支持,历时十余年,充分发挥了我们这个科研团体在矿物学、地球化学和土壤学等多学科综合研究的学科优势和地处西南岩溶地区中心地带的区域优势,以长期野外碳酸盐岩红色风化壳剖面地质调查的成果和室内样品薄片的分析测试为基础,较为系统、深入地研究了贵州及相邻岩溶地区碳酸盐岩风化成土作用过程、机理及环境效应,提出并论证了一系列关键的科学问题,揭示了碳酸盐岩风化成土地球化学过程、风化成土机理以及部分岩溶环境问题发生的

机制和规律,创立了碳酸盐岩红色风化壳形成的(富硅铝脱钙镁、富铁锰、富铝脱硅)三阶段地球化学演化过程和交代成土成因观点,初步构建起碳酸盐岩风化成土作用的理论框架,取得了一系列重要进展。

本书的前言,第一、三、四、七、八章,第五章第一、二、三、五节,第六章第二、三节由朱立军执笔;第二章、第五章第四节,第六章第一节由李景阳执笔;陈筠、梁风和陈静分别参加了第一章第四节、第五章第四节和第七章第四节的撰写;全书最后由朱立军统稿。

本书相关的研究工作得到了贵州工业大学、中国科学院地球化学研究所、北京大学(TEM分析)、北京理工大学(XPS分析)、北京师范大学(穆斯堡尔谱测定)、华东师范大学(磁学参数测定)、中国地质大学(北京)、北京科技大学(磁性分选)、贵州师范大学(SEM分析)、贵州地质矿产局和中国科学院地质与地球物理研究所的学者和实验室的支持和帮助。中国科学院院士欧阳自远教授在百忙之中欣然作序。作者指导的历届研究生和本科毕业生陈筠、梁风、牟成刚、陈静、周训华等参加了部分野外和实验工作,作者的同事王朝富、樊廷章、林进也等参加了早期研究工作。刘明锋同志为本书的文字录入付出了辛勤的劳动。作者一并在表表示衷心感谢和崇高敬意。

虽然本书的研究工作历时十余年,但作者系统总结和撰写成书却时间短促,加之水平所限,许多研究还不够深入,一些认识也不尽全面,恳请读者批评指正。

目 录

序

前 言

第一章 碳酸盐岩红色风化壳剖面特征	(1)
第一节 研究区概况	(1)
第二节 红色风化壳剖面特征	(2)
第三节 红色风化壳物理特征	(5)
一、物理性质特征	(5)
二、粒度成分特征	(6)
第四节 红色风化壳地球化学特征	(7)
一、主量元素地球化学特征	(7)
二、微量元素地球化学特征	(10)
三、稀土元素地球化学特征	(10)
四、岩—土界面地球化学特征	(16)
第二章 碳酸盐岩红色风化壳结构和构造	(22)
第一节 概述	(22)
第二节 红色风化壳结构、构造的概念	(23)
第三节 红色风化壳剖面的宏观结构、构造特征	(24)
一、红色风化壳结构和构造的剖面特征	(24)
二、红色风化壳结构和构造的宏观表现	(25)
第四节 红色风化壳的微结构特征	(26)
一、母岩碳酸盐岩微结构	(26)
二、溶滤层的微结构特征	(27)
三、红色风化壳微结构特征	(28)
第五节 讨论	(32)
第六节 小结	(34)
第三章 碳酸盐岩红色风化壳矿物特征及其环境意义	(36)
第一节 粘土矿物	(36)
一、样品和方法	(36)
二、高岭石和埃洛石	(36)
三、伊利石	(37)
四、水铝英石	(39)
五、1.4nm 粘土矿物	(39)
第二节 三水铝石	(42)

第三节 石英	(42)
第四节 氧化铁矿物	(43)
一、样品制备和分析方法	(43)
二、产出特征与化学成分	(43)
三、X 射线 (XRD) 分析	(45)
四、穆斯堡尔 (Mössbauer) 谱学	(47)
五、透射电镜 (TEM) 研究	(49)
六、环境意义	(49)
第四章 碳酸盐岩红色风化壳磁学性质及其发生机理	(53)
第一节 样品与方法	(53)
第二节 红色风化壳磁学性质特征	(53)
第三节 磁性矿物	(56)
第四节 碳酸盐岩红色风化壳磁学性质发生机理及其环境意义	(57)
第五章 碳酸盐岩风化成土地球化学过程	(60)
第一节 主量元素的演化特征	(60)
第二节 微量元素的地球化学行为	(63)
第三节 稀土元素的分异及演化	(64)
一、碳酸盐岩风化成土过程中稀土元素的活动性和分异	(64)
二、粘土矿物和氧化铁矿物对稀土元素地球化学行为的影响	(66)
第四节 碳酸盐岩红色风化壳淋滤试验	(67)
一、实验样品	(67)
二、实验方法	(68)
三、淋滤实验结果分析	(69)
四、小结	(75)
第五节 碳酸盐岩风化成土地球化学过程及其演化	(75)
一、主量元素因子分析	(75)
二、微量元素因子分析	(77)
三、几点认识	(77)
第六章 碳酸盐岩风化成土作用及机理	(79)
第一节 碳酸盐岩现代风化壳和古风化壳	(79)
一、碳酸盐岩现代风化壳	(79)
二、碳酸盐岩古风化壳	(80)
三、碳酸盐岩红色风化壳系统、结构、功能和作用	(81)
第二节 碳酸盐岩风化成土作用	(86)
一、岩溶水作用	(86)
二、风化溶蚀作用	(88)
三、交代成土作用	(90)
四、淀积成土作用	(91)
第三节 碳酸盐岩风化成土机理	(93)

一、岩溶环境中岩-土界面方解石的表面化学特征及其反应机理	(93)
二、粘土矿物成因及演化	(96)
三、氧化铁矿物形成的机理	(97)
第七章 碳酸盐岩风化成土作用的环境效应	(100)
第一节 红色风化壳中重金属元素的化学形态	(100)
一、重金属元素化学形态区分及其含义	(100)
二、红色风化壳中重金属元素的化学形态	(101)
三、风化成土作用对重金属元素化学形态的影响	(102)
四、氧化铁矿物对重金属元素的富集作用	(106)
五、小结	(107)
第二节 红色风化壳中矿物表面化学特征及其选择性吸附机理	(107)
一、样品与实验方法	(108)
二、实验结果与讨论	(108)
三、矿物表面化学特征及氟、砷污染的矿物学机制	(112)
第三节 黔中岩溶地区岩土水系统中氟的环境地球化学	(113)
一、样品与实验方法	(113)
二、氟在岩-土-水系统中的分布	(113)
三、岩溶地区岩土水系统中氟的迁移和富集	(115)
四、红色风化壳中针铁矿对氟的选择性吸附	(116)
第四节 红色风化壳中砷的迁移及污染机理	(118)
一、样品与实验方法	(118)
二、结果与讨论	(119)
三、小结	(121)
第八章 主要研究进展与展望	(122)
第一节 主要研究进展及科学意义	(122)
一、碳酸盐岩红色风化壳中粘土矿物成因及演化	(122)
二、碳酸盐岩红色风化壳中的氧化铁矿物及其环境意义	(123)
三、碳酸盐岩红色风化壳的磁学性质及其发生机理	(124)
四、碳酸盐岩风化成土作用、地球化学过程及机理	(125)
五、碳酸盐岩风化成土作用的环境效应	(126)
第二节 展望	(127)
参考文献	(129)
附录：本书作者在国内外发表的相关论著目录	(132)
图版	

第一章 碳酸盐岩红色风化壳剖面特征

碳酸盐岩红色风化壳是碳酸盐岩在热带、亚热带环境条件下的风化产物，也称之为碳酸盐岩红土，工程地质界则简称为红粘土。碳酸盐岩红色风化壳在碳酸盐岩-土-水-大气-生物构成的岩溶环境系统中占有十分重要的地位，具有较突出的地球化学敏感性和生态环境脆弱性特征，特别是近年来与碳酸盐岩红色风化壳有关的环境与灾害问题，如水土流失、酸雨、土壤和水体污染以及红粘土工程稳定性等，日益受到人们的广泛重视。全球碳酸盐岩出露面积约占陆地面积的 12%，主要集中分布在热带、亚热带地区，如东南亚、地中海沿岸和北美东南部。位于东南亚片区的中国南方是全球连片分布、面积最大的碳酸盐岩分布区，而以贵州、广西和云南最为集中。第四纪以来，中国南方碳酸盐岩分布区以亚热带湿润的季风气候为主，化学风化和成土作用强烈，地表广泛发育红色风化壳和岩溶地貌，在第四纪中国南方红土环境区形成了独特的岩溶地质地貌景观，其中尤以贵州岩溶地区最具代表性和典型性。因此，笔者选择贵州岩溶地区作为研究区主体。

第一节 研究区概况

研究区主要集中在北纬 $25^{\circ} \sim 29^{\circ}$ ，东经 $105^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 范围内的贵州岩溶地区。贵州是中国南方碳酸盐岩红色风化壳的主要分布区，地处中国西南部，其北起四川盆地南缘山地和鄂西南高原，南至南盘江河谷和桂西北山地，纵跨近 5 个纬度，长约 510km；西起滇东黔西高原，东至湘西丘陵山地，宽约 570km，具有典型的亚热带季风湿润气候和内陆高原岩溶山地自然环境。贵州各地年平均气温在 $8 \sim 12^{\circ}\text{C}$ ，绝大部分地区为 $14 \sim 18^{\circ}\text{C}$ ；年平均降水量在 850 ~ 1600mm 之间，除西北部威宁—赫章—毕节一带，绝大部分地区年降水量在 1100 ~ 1400mm 之间，其中 50% 以上的降水量集中于 6 ~ 8 月。贵州全年日照时数在 1200 ~ 1600h 之间，日照百分率为 30% 左右。在地形地貌上，贵州位于中国地势第二大梯级带向第三大梯级带过渡带上，平均海拔高度在 1100m 左右，整个地势由西向东表现为一个梯级状的大斜坡，即由西部海拔 2400 ~ 2000m 以上向东逐渐降低到黔中的 1400 ~ 1000m 和东部的 800 ~ 500m，构成区内地势的三大梯级。三大梯级上的地貌类型以岩溶高原、岩溶峰林盆地、岩溶丘原盆地、岩溶山原和山地丘陵等类型为主，由西向东也呈规律性分布。西部第一梯级带地势最高，为云南高原的延续部分，是贵州最典型的高原地貌，分布于威宁、赫章、水城一线，高原面大部分保存较好，其上常发育有厚达十余米的红色风化壳，高原的边缘切割强烈，形成高中山；中部第二梯级带是典型的山原和丘原分布区，形成贵州高原主体，其范围在遵义以南、惠水以北、黔西以东、镇远以西的广大地区，南北两大斜坡区则是山原分布区；东部第三梯级带指松桃、铜仁、玉屏、锦屏等地，是典型的低山丘陵区，与湖南丘陵区连成一片。

贵州自震旦纪到中三叠世，长期处于海相环境，连续沉积了上万米厚的沉积岩，其中

碳酸盐岩层累计厚度可达 8500m, 出露面积占全省总面积的 73%, 是中国碳酸盐岩分布最广泛的省份之一。晚三叠世的构造运动使贵州全面隆升为陆地, 结束了贵州海相地层发育的历史。晚三叠世晚期在贵州西部、北部形成较稳定的内陆湖相石英砂岩或长石砂岩。侏罗纪至始新世形成一套以砾岩、砂岩、泥岩为主的内陆盆地红层组合, 部分地区含石膏层, 或夹一些黑色泥岩和灰绿色砂岩以及灰岩、泥灰岩。早白垩世晚期, 盆地逐渐退缩到北部赤水地区, 到始新世、渐新世之交, 区内全部结束了大型内陆湖盆的沉积历史。渐新世以后, 全区逐渐变成丘陵地带, 在一些低洼地区和断陷盆地中沉积了一套红层砾岩、砂岩组合。新第三纪以来, 在大面积间歇性掀斜上隆活动的过程中, 形成新第三纪砂、泥和褐煤等潮湿温凉气候条件下的湖沼沉积和第四纪冰期、间冰期和冰后期的河流阶地及洞穴堆积。

第四纪以来, 贵州的气候与环境总体处于陆地生态系统, 气候变化大, 但变化幅度逐渐变小, 以亚热带温湿气候为主, 间有短暂的寒冷干旱气候期。早中更新世贵州的构造运动相对稳定, 与之相应的广泛夷平作用持续进行, 但气候变化较大, 冷暖和干湿交替频繁, 与整个华南地区总体气候特征一致, 仍以温暖湿润气候为主, 有利于红色风化壳的发育。中更新世以来形成了贵州高原的主要隆升时期, 地表剥蚀作用强烈, 许多山盆期夷平面被分解和破坏。一些原先平坦宽广、海拔不高的山盆期地面被分解成支离破碎、海拔高度自 700~800m 到 2200~2300m 不等的山原面。气候冷暖和干湿交替更为频繁, 不少地区还有冰川发育, 曾出现向干冷方向演变之势, 而后气候由温暖潮湿向温暖偏干燥类型演化。晚更新世以后, 贵州的生物气候和自然景观已大体和现代相当, 最终演变成当今贵州的生态环境和地貌景观。

第二节 红色风化壳剖面特征

贵州岩溶地区碳酸盐岩红色风化壳发育类型齐全, 特征明显, 一般厚度 8~10m, 最厚可达 20~30m。横向上, 其分布主要受岩溶地貌、水文及生态环境控制。在岩溶台地、缓丘和缓坡地带, 风化壳剖面厚度较大, 垂直分带完整; 峰丛高地及陡坡地带, 风化壳浅薄, 剖面发育不完整。发育较完整的风化壳剖面一般都具有明显的垂直分带结构 (表 1-1, 图 1-1, 图版 I-1、I-2), 按风化强度, 由上至下分为表土层 (I), 全风化层 (II), 半风化层 (III) 和基岩 (IV)。

I 表土层 位于风化壳剖面上部, 经历了风化壳发育的全过程, 是风化成土作用和成壤作用共同作用的产物, 主要由若干土壤发生层构成。贵州碳酸盐岩风化壳剖面上部的表土层土壤主要以黄壤和石灰土为主。黄壤是贵州碳酸盐岩风化壳上发育的主要土壤类型, 原生植被为亚热带常绿阔叶林、常绿-落叶混交林。在土壤剖面形态发生特征上, 由于土体经常保持湿润, 游离铁遭水化, 以针铁矿及多水氧化铁形态存在, 因而也使土壤呈黄棕色, 尤以淀积层最为明显。一般土壤层较厚, 多在 1m 左右, 呈弱酸、酸性反应 ($\text{pH} < 6.5$)。石灰土也是剖面上部发育的主要土壤类型, 其植被多属喜钙性, 如蕨类、五节芒、荩草等。石灰土层一般较薄, 多在 0.5m 以下, 呈中、碱性反应 ($\text{pH} > 6.5$)。根据所处成土作用阶段、发育程度和土壤发生层特征, 又可分为初始期、幼年期、发育期和成熟期土壤, 具有不同的矿物组合、结构和颜色等特征。

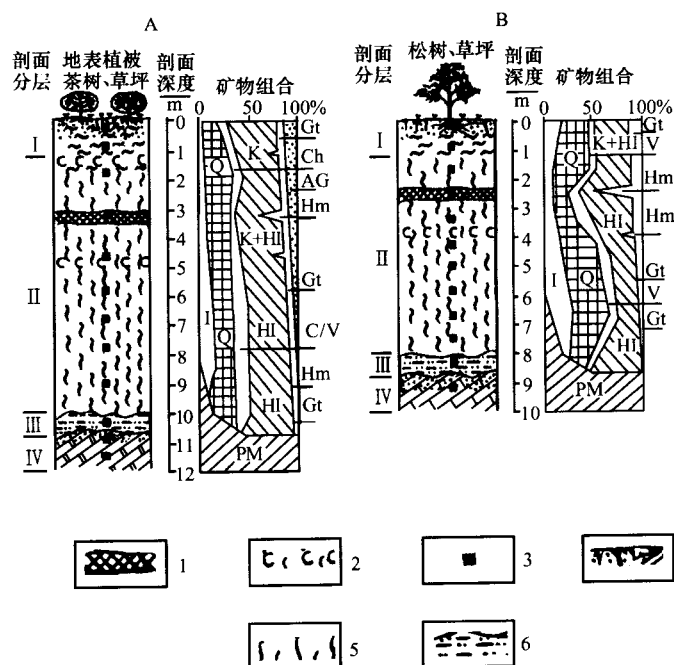


图 1-1 碳酸盐岩红色风化壳剖面特征

A—安顺白云岩红色风化壳剖面；B—遵义石灰岩红色风化壳剖面；K—高岭石；HI—埃洛石；I—伊利石；Ch—绿泥石；V—蛭石；C/V—绿/蛭间层矿物；Hm—赤铁矿；Gt—针铁矿；AG—三水铝石；Q—石英；PM—原生矿物；1—铁壳；2—铁质结核带；3—采样位置；4—表土层；5—全风化层；6—半风化层

II 全风化层 是风化壳剖面的主体，对于发育完整的风化壳剖面，一般可占整个剖面厚度的 90% 以上。全风化壳常间夹数层深红色或杂色铁锰质结核带或硬质铁壳。全风化层的矿物、结构和物理性质的垂直分带特征十分明显，可进一步划分出若干结构和矿物组合带，如高岭石三水铝石带、伊利石蛭石针铁矿带、绿泥石和绿泥石/蛭石间层矿物高岭石矿物带等（见表 1-1，图 1-1）。作为全风化层主体的土体，按其风化程度和颜色分为红色粘土层和黄色粘土层。红色粘土层一般位于风化层上部，其厚度随全风化层总厚度而变化，全风化层厚度愈大，红色粘土层厚度亦大。一般厚度为 3~5m，以其土体特有的棕红色或红黄色而得名。红色粘土层中常发育有较大的裂隙，裂隙面上铁质被膜覆盖，且常有近水平分布的砖红色铁质结核条带。红色粘土层土体含水量较低，处于硬塑—可塑状态。在发育较完整的红色风化壳剖面，黄色粘土层一般位于全风化层中下部，其所处风化程度和阶段低于红色粘土层，部分剖面常有红棕色小斑块或黑色铁锰质斑点分布，呈碎屑及蠕虫状土体构造，微裂隙发育，黄色粘土层天然含水量较大，一般可达 70%~80%，土体呈可塑—软塑状态。

III 半风化层 也可称为岩土过渡带，是土体向母岩碳酸盐岩的过渡带，一般厚 0.1~0.2m，矿物主要为埃洛石、伊利石、水铝英石和石英等风化成土初期阶段的新生矿物以及方解石、白云石等母岩风化残余矿物。根据野外剖面观察和室内薄片鉴定，半风化层普遍保持了母岩碳酸盐岩的结构构造特征（图版 I-3）。白云岩和石灰岩发育风化壳的半风

表 1-1 碳酸盐岩红色风化壳剖面垂直分带特征

风化壳剖面分层	风化成土强度与厚度/m	剖面特征	特征矿物组合	微结构特征	地球化学分带
表土层	很强, 0.1~1	土壤层	高岭石-针铁矿-三水铝石	团粒结构、海绵状结构、渗流管构造	有机质及生物富集带
全风化层	强, 1~5	红色铁铝质粘土层或铁壳	高岭石-针铁矿(赤铁矿)-三水铝石	凝胶结构、泥状结构、交代残余结构、假象交代结构、皮壳状构造、蜂窝状构造、肾状构造	富铝脱硅带
	强, 0.5~0.3	黄色含褐铁矿粘土层或条带状铁质结核带	针铁矿(赤铁矿)-硬锰矿(软锰矿)	泥状结构、泥质条带结构、交代残余结构、假象交代结构、鲕状构造、蜂窝状构造	富铁锰带
半风化层	中等, 0.1~0.3	杂色粘土层或含粘土多孔溶滤层	埃洛石-石英-水铝英石	泥状结构、交代残余结构、假象交代结构、多孔状构造、交代残余层理构造	富硅铝脱钙镁带
碳酸盐岩	弱, 0.1~1	裂隙或溶孔带	方解石-白云石	溶孔裂隙构造、原岩层理构造	物理崩解带

化层结构存在一定差异,白云岩风化壳的半风化层岩土界线清楚,底部风化白云岩呈粉砂状,结构疏松,称为“粒化层”,其上发育浅紫色或紫红色粘土层(图版 I-4);石灰岩风化壳的半风化层岩土界线不明显,常发育 2~3 层浅灰色至深灰色粘土层,称为“泥化层”(图版 I-5)。白云岩风化壳与石灰岩风化壳半风化层的差别在于前者发育“粒化层”,以母岩白云岩原生矿物成分为主;而后者发育“泥化层”,以风化成土作用形成的新生粘土矿物为主,但仍可见到许多风化呈粒状的方解石颗粒。从宏观上观察,碳酸盐岩风化壳岩土界面凹凸不平,常构成颇为壮观的土中石林(图版 I-6),突起的部分称之为“埋藏石芽”,凹下部分称之为“溶沟”或“溶槽”。在几米的范围内,突起和凹下的高差就可达 10 多米。半风化层上部的粘土层常具层纹状构造和色带及晕圈构造,白云岩发育风化壳多为浅紫色至深灰色,故统称为杂色层纹状粘土层,其纹层随下伏基岩而起伏。杂色粘土层处于岩土风化过渡带,土体天然含水量最大,一般可达 90%~100%,呈软塑状态。半风化层下部为碳酸盐岩与岩土溶蚀交代界面(也可称为风化交代前锋),多呈多孔疏松状,作者称其为溶滤层。石灰岩和白云岩的溶滤层明显不同,前者呈灰白色多孔疏松状,厚度不大,一般几厘米至十余厘米厚,粒度极细,尽管内部结构联结受到溶蚀交代,但外部石灰岩的层理构造等依然可见,并向上延续至上部粘土层中。后者白云岩的溶滤层为松散的白色白云岩砂,厚度较大,一般都大于 50cm,最厚者可达数米至十余米。

IV 基岩 红色风化壳剖面下伏基岩主要有:中三叠统关岭组(T_2g)灰岩、下三叠统茅草铺组(T_1m)和安顺组(T_1a)白云岩、下三叠统大冶组(T_1d)灰岩、下奥陶统大湾组(O_1d)瘤状泥灰岩以及中上寒武统娄山关群(ϵ_{2-3ls})白云岩等。其中安顺组、关岭组和娄山关群是研究区内分布最广、厚度最大的红色风化壳剖面的下伏碳酸盐岩基岩。

第三节 红色风化壳物理特征

一、物理性质特征

遵义石灰岩红色风化壳剖面及安顺白云岩红色风化壳剖面物理性质实验指标列于表 1-2 及表 1-3 之中。从表中可以看到,随着土层深度加深:第一,土的天然含水量不断增大,由 27.7% 至 66.2%,这一方面反映出下部基岩的透水性比土层更低,所以土中向下渗流的水分在岩面附近有滞留现象,另外也可能与表层土蒸发量较大有关;第二,土的状态由硬塑→可塑→软塑,这是由土层中含水量的变化所引起的;第三,碳酸盐岩层的原生孔隙率一般很低,只有 1%~3%,据韩宝平(1998)测定,翟山石灰岩和斑井大理岩孔隙率分别为 0.96%~0.82%,而土层的孔隙率却高达 44.02%~66.48%,土的孔隙比(土中孔隙体积与土粒体积之比)却由 0.7865 变为 1.8740。高孔隙率和高孔隙比是碳酸盐岩红色风化壳(工程上又称为红粘土)最显著的特性之一。这一孔隙率与多孔状溶滤层的孔隙率基本相当,反映出碳酸盐岩风化成土的过程是:由岩石→溶滤层→土层,土层是由溶滤层进一步经溶蚀-交代转化而来的,因而具有高的孔隙率。高孔隙率也为水的渗滤及进一步的风化成土作用提供了基本条件。

表 1-2 遵义剖面土层的物理性质指标实验结果

土样 编号	深度 m	含水量 %	塑限 %	液限 %	塑性指 数 I_p	液性指 数 I_L	含水比 μ 及状态	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	干重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率 %	孔隙比 e
ZL974-1	1.1	27.7	21.0	42.5	20.5	0.28	0.65 硬塑	19.3	15.1	2.70	44.02	0.7865
ZL974-2	3.1	59.9	48.7	92.2	43.5	0.26	0.65 硬塑	16.7	10.4	2.72	61.6	1.6040
ZL974-3	4.5	47.1	38.7	63.8	25.1	0.33	0.74 可塑	17.6	12.0	2.75	56.49	1.2984
ZL974-4	6.2	59.2	45.5	96.4	50.9	0.27	0.61 硬塑	6.8	12.3	2.73	61.35	1.5870
ZL974-5	10.2	46.3	64.7	64.7	30.3	0.39	0.72 可塑	7.7	12.1	2.72	55.52	1.2482
ZL974-6	12.0	55.9	55.7	55.7	28.7	1	1 软塑	8.7	12.0	2.72	55.9	1.2676

表 1-3 安顺剖面土层的物理性质指标实验结果

土样 编号	深度 m	含水量 %	塑限 %	液限 %	塑性指 数 I_p	液性指 数 I_L	含水比 μ 及状态	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	干重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率 %	孔隙比 e
PN974T-2	1.7	51.9	49.3	79.4	30.1	0.086	0.65 硬塑	16.8	11.1	2.73	59.49	1.468
PN974T-4	2.7	55.2	48.5	99.6	57.5	0.13	0.55 硬塑	16.4	10.6	2.73	61.29	1.5835
PN974T-6	4.1	61.6	55.4	106.4	51	0.12	0.58 硬塑	16.2	10	2.72	63.14	1.713
PN974T-8	6.0	63.1	53.2	105.4	52.2	0.19	0.6 可塑	16.5	10.1	2.77	66.48	1.728
PN974T-9	7.0	63.8	55.3	82.6	27.3	0.31	0.77 可塑	16.5	0.97	2.75	63.37	1.73
PN974T-10	8.0	58.3	49.1	104.7	55.6	0.17	0.56 硬塑	16.7	10.6	2.72	61.21	1.578
PN974T-11	9.0	66.2	59.3	106.3	57	0.12	0.57 硬塑	15.9	0.96	2.75	65.21	1.874
PN974T-12	13.0	63.3	36.2	80.7	44.5	0.61	0.78 可塑	16.7	11.4	2.73	62.5	1.67

二、粒度成分特征

1. 粒度成分的测定方法

由于风化壳土层属于细粒黏性土，所以采用密度计法进行测定，密度计法是通过测定土粒在静水中沉降速度后求得相应的土粒直径。这一方法为国家标准《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)所规定。在制备土样悬液时为使土粒充分分散，按试验规程应加入4%的六偏磷酸钠10mL分散剂，由于悬液分散不好，且稳定性差，后又加入10mL分散剂，样品的其他制备方法也按规范规定执行。

2. 粒度分析试验结果

由表1-4可知，风化土层粘粒粒组($<0.005\text{mm}$)的含量除个别样品(ZL974-6)之外，均 $>30\%$ ，而且有的达到或接近重粘土的粒组含量(粘粒含量 $>60\%$)，所以两个典型红色风化壳的土均属于粘土。分析和研究粘粒含量($<0.005\text{mm}$)随土层深度的变化曲线(图1-2)可知，粘粒组含量变化的主要趋势是自表土层到深处逐渐减少，而粉粒含量($0.005\sim0.05\text{mm}$)自上而下逐渐增多，在靠近基岩的底部土层粘粒含量分别为25%和35%，而粉粒含量最高可达51.3%~66.8%。这表明在靠近基岩的新生土层中粉粒含量高，随着土层的进一步风化和红土化，粒度变细。一个十分有趣的现象是：作者在偏光显微镜下所观察到的遵义石灰岩和安顺白云岩矿物颗粒大小大都介于极细砂—粉砂粒径之间，与靠近基岩土层粉砂含量高的趋势相吻合。这是否又从另外一个侧面说明，土层的粒度是由交代岩石中的矿物粒径继承而来的？这是值得进一步研究的问题。

表 1-4 遵义、安顺碳酸盐岩风化壳土层的粒度分析结果

取样地点	样品编号	取样深度 m	粒径(mm)及百分含量(%)						细砂含量 %	粉砂含量 %	粘粒含量 %
			>0.1	$0.05\sim0.1$	$0.01\sim0.05$	$0.005\sim0.01$	$0.002\sim0.005$	<0.002			
遵义剖面	ZZ974-2	3.0~3.17	2.67	1.4	22.5	7.1	11.4	47.0	4.07	29.6	59.4
	ZZ974-3	4.4~4.7	1.2	0.5	29.5	10.0	13.8	36.0	1.7	39.5	49.8
	ZZ974-4	6.1~6.4	3.64	0.4	23.9	3.90	7.5	52.5	4.04	27.8	60.0
	ZL8	8.0	1.57	0.4	27.2	11.9	15.0	33.5	1.97	39.1	48.5
	ZL9	9.0	2.91	0.4	28.6	13.8	10.0	39.0	3.31	42.4	49.0
	ZL974-5	10.2~10.4	9.02	2.8	39.9	11.8	14.1	21.4	11.8	51.7	35.5
	ZL974-6	11.8~12.1	4.11	1.7	48.2	18.6	15.0	10.0	5.81	66.8	25.0
安顺剖面	PN974-2	1.7~1.8	2.75	1.7	25.1	7.6	18.3	40.7	4.45	32.7	59.0
	PN974-3	2.1~2.2	1.95	0.2	19.7	10.1	9.4	50.0	1.15	30.4	59.4
	PN974-4	2.7~2.8	2.2	1.7	22.8	11.8	14.9	40.8	3.9	34.6	55.7
	PN974-5	3.7~4.0	8.12	0.2	20.7	10.1	10.7	45.0	8.32	30.8	55.7
	PN974-6	4.0~4.1	1.9	1.3	28.0	10.0	8.0	42.0	3.2	38.0	50.0
	PN974-7	5.5~5.6	2.83	0.2	32.7	9.8	9.5	37.5	3.03	42.5	47.0
	PN974-8	5.7~6.0	1.71	0.2	31.1	9.4	11.5	37.5	1.91	40.5	49.0
	PN974-9	6.9~7.0	0.0	1.7	38.3	10.5	24.5	15.0	1.7	48.8	39.5
	PN974-11	9.0~9.1	3.8	1.0	31.3	8.0	9.5	40.0	4.8	39.3	49.5
	PN974-12	13.0	7.06	2.1	38.3	13.0	10.0	25.0	9.16	51.3	35.0

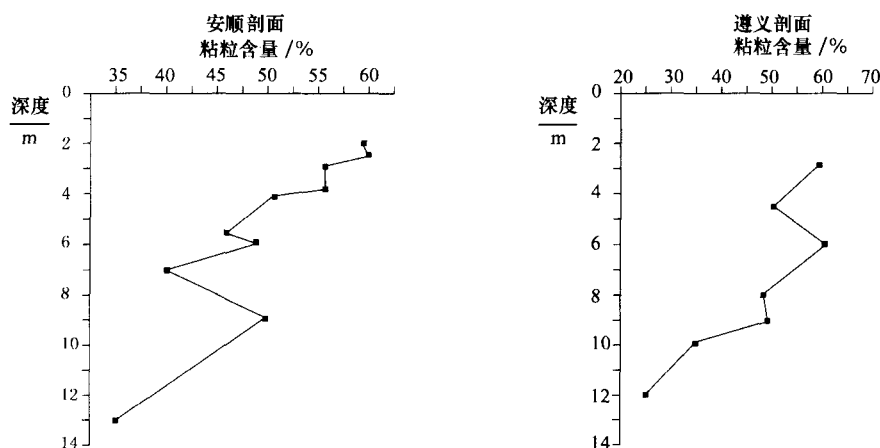


图 1-2 遵义、安顺剖面土层的粘粒含量随深度的变化曲线

第四节 红色风化壳地球化学特征

一、主量元素地球化学特征

化学风化作用的基本过程是母岩中原生矿物发生溶解、蚀变，释放出的 Ca、Mg、K、Na、Si、Al、Fe、Mn、Ti 等进入溶液被带走或沉淀或直接转变（交代）形成新的次生矿物。因此，不同母岩在一定气候环境条件下风化成土作用的最终产物，即红色风化壳的主量元素地球化学特征总的演化趋势是一致的。随着母岩矿物在风化过程中的分解和转化，活动性主量元素（如 Ca、Mg、K、Na）随风化流体发生显著的迁移并被带出风化壳，使风化壳中的活动性主量元素相对于母岩中逐渐减少，而相对迁移性弱或惰性的主量元素（如 Si、Al、Fe、Mn）等则残留在风化壳中，相对于母岩富集。由于碳酸盐岩与花岗岩、玄武岩等以硅酸盐矿物作为主要造岩矿物的岩石在化学成分上的差异，使碳酸盐岩红色风化壳剖面主量元素含量与由非碳酸盐岩母岩发育的红色风化壳主量元素相对于母岩富集的程度不同，主要有以下特征（表 1-5；图 1-3）。

1) SiO_2 是碳酸盐岩中的次要组分，一般含量仅在 3% 左右，但却是红色风化壳中主要化学成分，含量变化范围为 23% ~ 68%。在发育较好、风化强度较大的红色风化壳剖面中， SiO_2 含量沿剖面垂向上存在由富集到淋失的演化特征。这说明碳酸盐岩风化成土过程中，初期 SiO_2 的富集是显著的，碳酸盐岩红色风化壳的风化成土作用包含着富硅和脱硅两个不同的地球化学过程，与花岗岩、玄武岩等岩石发育红色风化壳时的风化成土作用一直处于脱硅过程不同。

2) Al_2O_3 和 Fe_2O_3 是红色风化壳的主要化学成分，含量分别为 12% ~ 37% 和 3.3% ~ 12%，部分地段产出的铁壳 Fe_2O_3 含量可达 48%，而母岩碳酸盐岩中的 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 之和尚不足 1%。因此，碳酸盐岩风化成土作用对 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的富集作用是明显的。在剖面上， Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量在垂向上也都呈逐渐增加的变化趋势，但由于地球化学性质的差异，在风化成土过程中两者的分异也是很明显的。红色风化壳形成和演化过程中