西南岩溶区典型矿山污染防治对策与建议

张连凯　孔祥胜　主编

Countermeasures and Suggestions on Pollution Control of Typical Mines in Karst Area of Southwest China

云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

XINAN YANRONGQU DIANXING KUANGSHAN
WURAN FANGZHI DUICE YU JIANYI

西南岩溶区典型矿山污染防治对策与建议

张连凯　孔祥胜　主编

云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目（CIP）数据

西南岩溶区典型矿山污染防治对策与建议 / 张连凯，孔祥胜主编. -- 昆明 : 云南大学出版社, 2022
ISBN 978-7-5482-4657-2

Ⅰ. ①西… Ⅱ. ①张… ②孔… Ⅲ. ①岩溶区—矿山—环境污染—污染防治—西南地区 Ⅳ. ①X751

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第162036号

策划编辑：李俊峰
责任编辑：范　娇
封面设计：王嫣一

西南岩溶区
典型矿山污染防治
对策与建议

张连凯　孔祥胜　主编

出版发行：云南大学出版社
印　　装：昆明理煜印务有限公司
开　　本：787mm×1092mm　1/16
印　　张：8.75
字　　数：152千
版　　次：2022年9月第1版
印　　次：2022年9月第1次印刷
书　　号：ISBN　978-7-5482-4657-2
定　　价：39.00元

社　　址：昆明市一二一大街182号（云南大学东陆校区英华园内）
邮　　编：650091
发行电话：0871-65033244　65031071
网　　址：http://www.ynup.com
E - mail：market@ynup.com

若发现本书有印装质量问题，请与印厂联系调换，联系电话：0871-64167045。

本书得到了中国地质调查局地质调查项目“西江中下游岩溶峰林区1:5万水文地质环境地质调查（DD20160301）”、桂林市重点研发计划项目“桂林市恭城县水土污染综合治理关键技术研究与应用示范（2020010403）”等的资助。

主　编

张连凯　　孔祥胜

编写人员

张连凯　　孔祥胜　　刘朋雨　　杨　慧

刘红豪　　覃小群　　黄奇波　　苗　迎

黄　超　　徐　灿　　杨金江　　刘　翔

宋　涛　　李丹阳　　张熙璐

前 言

我国的西南岩溶区是世界上岩溶连片分布面积最大、岩溶发育最为强烈的典型生态脆弱区。该地区山高水深、位置偏僻却人口过亿，矿产资源丰富但水土流失严重，人地矛盾极其突出，是我国贫困和环境退化问题最为严重的“老、少、边、穷”地区。由于岩溶作用的基础——可溶岩（如石灰岩、白云岩等）的风化作用以化学溶蚀作用为主，90% 以上的物质都溶解于水中并被水带走，留下的成土物质极少，成土速率慢，土层薄，土壤保肥能力差。岩溶区特有的地表、地下双层结构，以及地下漏斗、落水洞、管道、裂隙发育，使得土壤营养元素很容易在淋溶作用下进入地下水系统，给岩溶环境带来一系列区别于其他非岩溶地区的特殊环境地质问题，如石漠化、岩溶塌陷、岩溶干旱、岩溶地下水污染等。同时，西南岩溶区还是我国矿产集中分布区，有中国“有色之乡”“中国锡都”等称号。长期以来，由于采用粗放式开采，出现了矿山大面积剥离、矿渣随意堆砌、矿坑水随意排放等现象。这些过程产生的污染物质在岩溶区很容易通过岩溶裂隙、管道和土壤进入岩溶关键带系统，污染地表和地下岩溶空间，造成区域生态破坏、环境恶化，极大地影响着西南岩溶地区经济社会的发展。

基于此，本书在前人研究的基础上，通过野外调查和深入分析资料，对西南岩溶区西江中下游的典型矿山的总体污染情况进行系统研究，全面掌握了 10 个典型矿山土壤和地下水污染现状，分析了矿区植被对重金属的富集系数，筛选了利于矿山生态修复的本地物种，并针对不同矿山的污染情况和修复治理技术，提出不同的修复治理建议。同时，本书选择大新铅锌矿、六汤稀土矿以及南丹有色金属矿区开展污染物在矿区周围岩溶关键带系统中的迁移转化行为研究，揭示了影响污染物运移的关键因子，分析了土壤、底泥、岩溶地下空间的氧化还原条件对污染物质迁移的影响，并在矿区周围发现了黑藻、水绵、桉树等可以开展生态

修复的生物物种，为矿山生态修复找到了一种廉价易得、制备简便的生物技术措施。此外，本书还分析了岩溶矿区有机污染物的来源和组成特征，对其在岩溶水—土系统中的运移转化过程和生态风险进行了评价，为下一步的岩溶区有机污染治理工作提供思路。最后，本书选择了典型的土壤—地下水系统，通过分析，指出了土壤理化性质对无机和有机污染物归趋构成的影响，以及土壤作为岩溶区重要的过滤介质对矿区产生的污染物质具有较好的过滤作用，但是由于土层薄、分层不明显以及特殊的土壤结构，造成岩溶区土壤对污染物的过滤作用十分有限，污染物质很容易通过土壤层直接进入地下含水空间。

本书共分为 7 章。第一章介绍西南岩溶地下水资源的概况，由张连凯、杨慧、黄超、刘翔编写，张连凯统稿。第二章分析了西江中下游 10 个矿山的水土污染现状及优势种群，提出了生态修复对策和建议，由刘朋雨、覃小群、黄奇波、宋涛编写，刘朋雨统稿。第三章介绍铅锌矿的地下水和土壤中重金属的形态分布和运移规律，由张连凯、刘红豪、徐灿、张熙璐编写，张连凯统稿。第四章介绍一座稀土矿山的污染现状及生态修复建议，由张连凯、覃小群、杨金江、李丹阳编写，张连凯统稿。第五章介绍有色金属矿区地下河中的砷污染过程，由杨慧、刘朋雨、刘红豪、徐灿编写，杨慧统稿。第六章介绍地下河中的有机物污染特征，由孔祥胜、覃小群、苗迎、黄超编写，孔祥胜统稿。第七章介绍岩溶区土壤对污染物的过滤作用，分析了土壤理化性质对有机和无机污染运移的影响。由孔祥胜、黄奇波、苗迎、徐灿编写，孔祥胜统稿。

我们在编写过程中参阅了大量国内外学者的文献资料，在此感谢各参考文献的作者。同时，也对关心、帮助和指导过本书编写的各位老师表示衷心感谢。由于编写时间比较仓促，书中的不足和疏漏之处在所难免，敬请广大读者指正。

编　者

2022 年 1 月 9 日

目 录

第一章　我国西南岩溶区地下水资源概况 / 1

一、我国西南岩溶地区的生态环境 / 1

二、西南岩溶地下水资源及开发利用概况 / 4

三、我国西南岩溶区矿山开采污染现状及特点 / 6

第二章　西江中下游典型矿区污染调查 / 10

一、西江中下游调查区概况 / 10

（一）地理位置 / 10

（二）气象水文 / 11

（三）地质条件 / 12

（四）矿产资源 / 13

二、矿区污染调查概况 / 14

（一）融安县矿区 / 16

（二）河池大厂、车河、芒场矿区 / 17

（三）环江县矿区 / 18

（四）融水元宝山矿区 / 18

（五）阳朔县矿区 / 19

（六）荔浦市矿区 / 19

（七）平果县矿区 / 20

（八）德保县矿区 / 20

三、矿区污染调查内容与方法 / 21

（一）调查内容 / 21

（二）调查方法 / 21

（三）土壤调查 / 22

（四）植被调查 / 22

四、矿区环境现状分析 / 22

（一）土壤环境状况 / 22

（二）地表水状况 / 25

（三）植物重金属富集状况 / 27

五、结论及建议 / 30

第三章　大新铅锌矿区水体重金属污染及水生植物富集 / 32

一、调查区概况 / 32

（一）地理位置 / 32

（二）地质背景条件 / 33

（三）水文地质条件 / 34

二、存在的主要环境问题 / 35

三、大新铅锌矿水污染调查 / 37

（一）调查分析方法 / 37

（二）调查结果及分析 / 37

四、黑藻和水绵吸附岩溶水中的重金属 / 41

（一）黑藻和水绵体内重金属的富集作用 / 41

（二）黑藻和水绵重金属吸附机理 / 44

（三）黑藻和水绵在岩溶水重金属修复中的应用前景 / 46

五、对策与建议 / 48

第四章　六汤稀土矿山调查与生态修复建议 / 50

一、六汤稀土矿山概况 / 50

二、地质背景条件 / 51

三、水文地质条件 / 53

四、矿区含水层 / 53

五、污染情况调查 / 54

（一）矿区基本情况调查 / 54

（二）土壤调查 / 54

（三）植被调查 / 57

（四）水污染调查 / 58

六、对策与建议 / 60

（一）稀土矿山生态修复技术探究 / 60

（二）结论及建议 / 61

第五章　典型岩溶地下河砷污染 / 63

一、里湖地下河调查区概况 / 63

二、研究方法 / 64

三、砷在地下河中的迁移转化过程 / 65

四、砷在岩溶地下河中的地球化学影响因素分析 / 68

（一）阳离子对地下河沉积物中砷含量的影响 / 68

（二）阴离子对地下河沉积物中砷含量的影响 / 71

（三）有机质对地下河沉积物中砷含量的影响 / 72

（四）其他影响因素 / 73

五、结论及建议 / 75

第六章　典型岩溶地下河有机污染 / 76

一、百朗地下河调查区概况 / 76

二、研究方法 / 77

三、地下河水化学组分及污染分析 / 78

（一）有机氯农药的含量及组成 / 79

（二）HCHs 的组成特征 / 81

（三）DDTs 的组成特征 / 83

（四）有机氯农药的分布特征 / 84

（五）有机氯农药生态风险评价 / 89

五、地下河 PAHs 的含量及组成特征 / 90

（一）水中 PAHs 的含量和组成 / 90

（二）地下河中 PAHs 的分布特征 / 92

（三）地下河中 PAHs 的来源分析 / 94

（四）地下河中 PAHs 的污染评价 / 96

六、结论与建议 / 97

第七章　土壤理化性质对污染物迁移的影响 / 99

一、南宁市城区概况 / 99

二、研究方法 / 101

三、土壤理化性质与重金属的关系分析 / 102

（一）土壤理化性质相关性分析 / 102

（二）重金属与土壤理化性质的相关性 / 104

四、土壤理化性质与地下水化学指标的关系 / 108

（一）土壤理化性质与地下水重金属相关性 / 108

（二）土壤理化性质与地下水 pH、TN 和 TP 的相关性 / 109

五、土壤理化性质与有机污染物的相关性 / 110

（一）土壤中有机氯农药的分布特征 / 110

（二）土壤中挥发性有机物的分布特征 / 114

（三）土壤理化性质与有机污染物的相关性 / 116

六、结论与建议 / 117

参考文献 / 118

第一章　我国西南岩溶区地下水资源概况

一、我国西南岩溶地区的生态环境

碳酸盐岩是地球上一类特殊的沉积岩石类型。地球上的碳酸盐岩的分布面积约为 $2200\times10^4km^2$，占陆地面积的 15%[①]。我国是岩溶分布大国，我国的碳酸盐岩出露面积约为 $91\times10^4km^2$，加上已知的隐伏于不同深度的碳酸盐，总分布面积可达 $340\times10^4km^2$ 以上，占国土面积的 1/3[②]。我国西南岩溶山区涵盖广西、贵州、云南、广东、湖南、湖北、四川及重庆 8 个省（区、市），位于东经 100° 34′ ~114° 10′，北纬 22° 00′ ~30° 04′之间，东西跨度 1380km，南北跨度 1010km，覆盖珠江流域及部分长江流域，出露面积达 $54\times10^4km^2$，占国土面积的 27%，处于南方东南亚连片岩溶分布区的核心地区[③]。

我国西南岩溶区有丰富的森林、矿产、水资源和土地资源。这里不但产出大部分的热带、亚热带经济作物，而且还出产 60% 的石油、天然气。世界上已经确认的日产万吨以上的油井，大都分布在岩溶区。这里还蕴藏有丰富的铝土矿、铅、锌、铜、锡等矿产。据统计，世界上的铝土矿资源总量的 14% 与岩溶有关。我国南方岩溶区为主要的有色金属成矿带，盛产铜、铅、锌、锡、锑、汞、砷等矿产。华北各省和南方石炭系及二叠系的煤、铝土矿、黄铁矿，大都与岩溶有密

---

① Ford D C，Williams P W. Karst Geomorphology and Hydrology [M]. London：Unwin Hyman Ltd.，1989.

② 李大通，罗雁 . 中国碳酸盐岩分布面积测量 [J]. 中国岩溶，1983，2（2）：147−150.

③ 洪业汤 . 岩溶（喀斯特）环境与西部开发 [J]. 第四纪研究，2000，20（6）：532−538.

切关系。四川的天然气资源和任丘等地的古潜山式油气田，也大多产自岩溶化层位[①]。

我国西南岩溶区虽然有丰富的农林资源、矿产资源、水资源、旅游资源，但是其环境容量比较低。岩溶区被视为一种同沙漠边缘一样的脆弱环境[②]，是世界上主要的生态脆弱带之一，一旦遭到破坏，就很难恢复[③④⑤]。而且由于地下漏斗、落水洞、管道、裂隙发育[⑥]，土壤营养元素很容易在淋溶作用下进入地下水系统[⑦⑧]。

由于碳酸盐岩具有可溶性，加上我国南方高温多雨、雨热同季，我国西南岩溶区具有以下特点[⑨]：（1）长期强烈的岩溶作用产生了地表、地下双层空间结构，形成了“土在楼上、水在楼下”的水土资源不配套的基本格局。岩溶区的落水洞、地下河天窗等岩溶形态，与地下空间系统连通，降水入渗系数很高，使得地表严重缺水而地下水特别丰富。（2）由于石灰岩溶蚀慢，酸不溶解物含量低，其风化成土速率很慢，形成 1m 厚的土层需要 250~7880ka[⑩]。在长期的剥蚀作用下，西南岩溶地区岩石裸露、土层浅薄（一般厚度只有 20~30cm）且不连续，土壤多分布在石缝或岩溶裂隙中，缺水、少土、植被覆盖率低是其基本特点。

---

① 袁道先，蔡桂鸿 . 岩溶环境学 [M]. 重 庆：重庆出版社，1988.

② 袁道先 . 论岩溶环境系统 [J]. 中国岩溶，1988，7（3）：179−186.

③ Wang Y，Xu Y，Qi S，Li X，Kong X，Yuan D，Theodore O I. Distribution and potential sources of organochlorine pesticides in the karst soils of a tiankeng in southwest China [J]. Environmental Earth Sciences，2013，70（6）：2873−2881.

④ Nguyet V T M，Goldscheider N. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk，and its first application in a tropical karst area，Vietnam [J]. Hydrogeology Journal，2006，14（8）：1666−1675.

⑤ Jiang Z，Lian Y，Qin X. Rocky desertification in Southwest China：Impacts，causes，and restoration [J]. Earth−Science Reviews，2014，132（5）：1−12.

⑥ Yuan D. Karst dynamic systems of China [M]. Beijing：Geological Publishing House，2002.

⑦ Yuan D. Karst dynamic systems of China [M]. Beijing：Geological Publishing House，2002.

⑧ 王英辉，祁士华，李杰，刑新丽，舒菲菲，王向琴，王琚，刘华峰，张俊鹏 . 广西桂林大岩洞岩溶洞穴土壤中有机氯农药的分布特征 [J]. 地质通报，2008，26（11）：1470−1475.

⑨ 揭国民，邵学栋，陈洪松 . 西南岩溶地区的主要生态环境问题及其防治对策 [J]. 农业现代化研究，2005，26（5）：374−377.

⑩ 袁道先 . 中国岩溶学 [M]. 北京：地质出版社，1993.

（3）受地形、地质条件限制，岩溶区被复杂的地质构造、地层以及深切的河流分割成许多水、热、生物地球化学背景条件千差万别的小单元。各种类型小生境的组合及其时空变化的无序性，导致了西南岩溶地区小生境类型的多样性[①]。（4）由于岩溶环境容量小，土地承载力低，土壤保肥能力差，环境系统内物质的移动能力很强，抗干扰能力弱，植被一旦被破坏，极难恢复[②]。

由于人类对这些资源的开发日渐增多，岩溶地区已经出现了许多特殊的环境效应，成为岩溶环境学研究的重要课题。例如广西泗顶铅锌矿，自 1960 年投产 10 年间，其岩溶塌陷范围随着矿坑排水量的加大而不断向南发展。1963 年，塌陷仅分布在采矿区附近。1964—1965 年间，当排水量增加到 2500m^3/d 时，泗顶镇发生了 37 个塌陷、25 条地裂，泗顶镇因此被迫迁移。1970—1971 年间，当排水量增加到 3400m^3/d 时，塌陷区又发展到了泗顶镇小河地区，在河床中出现了 10 多个直径 4~6m、深度 9~10m 的塌陷，河水灌入矿坑，威胁到矿坑的安全，不得不采取工程措施将小河改道[③]。

岩溶区的一些问题虽经过长期治理但得不到很好的解决，而且新的问题又不断出现。主要原因是人们对岩溶环境特点认识不足，对于岩溶环境系统的结构缺乏了解，特别是环境科学和岩溶学、地质学缺乏有机结合。因此，岩溶地区的环境问题，不论是环境系统的构成，可更新、不可更新的资源类型，自然灾害以及人为的和自然的污染问题，都有其特殊性。与非岩溶区相比，岩溶区的这些问题往往要复杂得多。加上岩溶区面积广阔，人口密集，资源丰富，人类为了开发利用这些资源，要改造这种环境，就必然要接受岩溶地区各种复杂问题的挑战。

---

① 王瑞江，姚长宏，蒋忠诚，裴建国 . 贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治 [J]. 中国岩溶，2001（3）：211-216.

② 蒋勇军，章程，袁道先 . 岩溶区土壤肥力的时空变异及影响因素——以云南小江流域为例 [J]. 生态学报，2008，28（5）：2288-2299.

③ 袁道先，蔡桂鸿 . 岩溶环境学 [M]. 重 庆：重庆出版社，1988.

二、西南岩溶地下水资源及开发利用概况

我国西南岩溶地区以碳酸盐岩为主，总厚可达 3000~10000m[①]，以寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系及中、下三叠系为主[②]。区域分布上，西南岩溶可分为四类岩溶区[③]：（1）滇、黔、桂新华夏系一级隆起带纯碳酸盐岩裸露型岩溶区。该区主要以峰丛洼地为主，碳酸盐岩沉积厚度大，无隔水层，或碳酸盐与非可溶岩交替出现。岩溶水以地下河或泉为主，主要问题为地表水土漏失，人畜饮水困难，石漠化问题严重。（2）湘桂沉降带覆盖型岩溶区。该区的主要特点是以峰林平原为主，土地分布范围广，地下水埋藏一般较浅，但分布不均。（3）川南重庆沉降带埋藏型岩溶区。该区主要的岩溶地层出露在北东向的背斜轴部，岩溶水出露成“天池”，常有温泉，但存在岩溶水污染、煤矿开采和交通建设造成的岩溶泉干枯情况。（4）滇东断陷盆地及山地岩溶区。该区通常具有新生代沉积。土地分布在高原面上，周边岩溶发育，地下河深埋、水源漏失、盆地降水小于山地，形成干坝。

受地形地貌和岩溶条件的限制，西南地区地表水和地下水在空间上分布极不均匀，地下岩溶含水介质以管道和溶蚀孔隙为主，具有高度不均一性。含水岩组分为岩溶水、基岩裂隙水和松散岩类孔隙水三种类型[④]。根据岩溶地下水的出露条件，西南岩溶水系统可划分为两大类型和四个亚类[⑤]。第一大类为裸露型岩溶水系统。岩溶水基本分布在侵蚀基准面以上，并以泉和暗河的形式向外排泄。第

---

① 李大通 . 碳酸盐岩层的分类原则和确定类型的 BASIC 程序 [J]. 中国岩溶，1985（4）：55−64.

② 蒋忠诚，夏日元，时坚，裴建国，何师意，梁彬 . 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析 [J]. 地球学报，2006，27（5）：495−502.

③ 袁道先 . 岩溶地区的地质环境和水文生态问题 [J]. 南方国土资源，2003（1）：22−25.

④ 蒋忠诚，夏日元，时坚，裴建国，何师意，梁彬 . 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析 [J]. 地球学报，2006，27（5）: 495−502.

④ 卢丽，王喆，裴建国，邹胜章，林永生，樊连杰 . 西南地区典型岩溶地下水系统污染模式 [J]. 南水北调与水利科技，2018，16（6）：89−96.

⑤ 蒋忠诚，夏日元，时坚，裴建国，何师意，梁彬 . 西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析 [J]. 地球学报，2006，27（5）：495−502.

一大类又可划分为两个亚类：（1）表层岩溶水系统。表层岩溶泉大部分属风化裂隙带下降泉，风化带的厚度一般为 2~30m，其中 2~10m 最为发育。（2）浅层岩溶水系统主要是由溶隙、溶洞及管道等多介质所构成的暗河系统，在石山地区的埋藏深度一般为 50~300m。第二大类覆盖—埋藏型岩溶水系统：（1）覆盖型浅层岩溶水系统，覆盖有 10~30m 厚和第四系潜水含水层，而且两者存在密切的水力系统。岩溶含水层一般岩溶化程度高，常构成网状溶隙系统，补给条件好，富水性强，具有较高的开发价值，是城镇供水的重要水源。（2）埋藏型深层岩溶水系统，常分布在中新生界断陷盆地内，岩溶含水层埋藏在相对隔水的第三系或白垩系之下，其厚度一般为 100~500m。

由于气候湿热，降水充沛，岩溶水循环交替作用强烈，溶孔、溶隙、溶洞及暗河水系十分发育，大部分水资源储存在地下空间[①②]，成为岩溶区重要的饮用、灌溉、农业和工业水源，在有些地方甚至是唯一水源[③]。近年来，在自然资源部和财政部的大力支持下，中国地质调查局会同有关省级人民政府及其自然资源主管部门，组织实施了一系列岩溶地质调查项目，相继完成了 1:25 万水文地质环境地质调查 $78\times10^4km^2$，1:5 万水文地质调查 $30\times10^4km^2$，1:5 万岩溶塌陷调查 $3\times10^4km^2$，建立了 10 处石漠化综合治理示范区，调查了具有开发价值的岩溶洞穴和天坑 3000 多处，在有效服务与区域经济社会发展方面取得了突出成就。同时，构建了岩溶地下水富水模式、成井模式和有效开发利用模式，成井 30 多眼，解决了 5 万多人的饮水困难[④]。

根据最新的调查结果[⑤]，我国西南岩溶石山区地下水资源丰富，开发利用潜力

---

① 袁道先 . 中国岩溶学 [M]. 北京：地质出版社，1993.

② 王瑞江，姚长宏，蒋忠诚，裴建国 . 贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治 [J]. 中国岩溶，2001（3）：211−216.

③ 曹建华，袁道先，潘根兴 . 岩溶生态系统中的土壤 [J]. 地球科学进展，2003，18（1）：37−44.

④ 夏日元，蒋忠诚，邹胜章，曹建华，覃小群，苏春田，罗为群，周立新 . 岩溶地区水文地质环境地质综合调查工程进展 [J]. 中国地质调查，2017，4（1）：1−10.

⑤ 夏日元 . 西南岩溶石山区地下水资源调查评价与开发利用模式 [M]. 北京：科学出版社，2018.