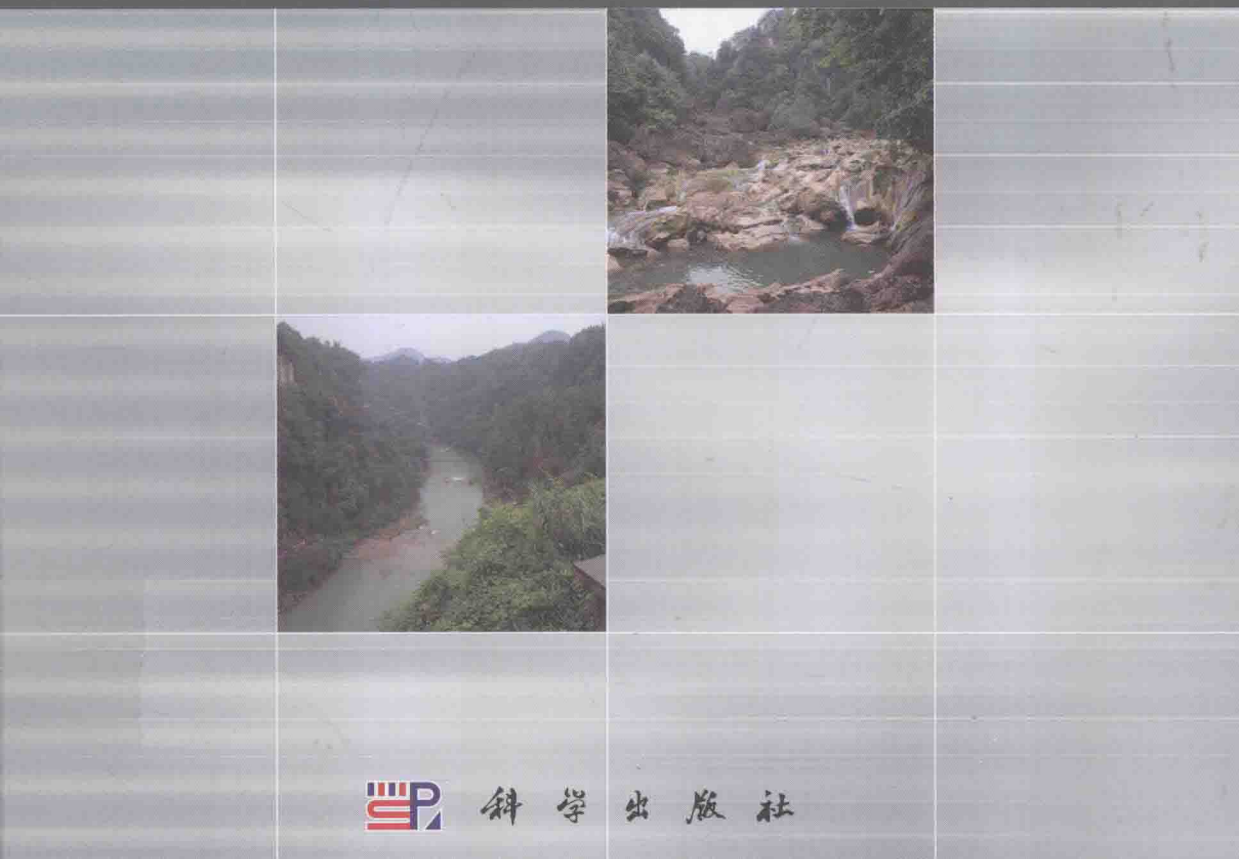




西南喀斯特地区水循环过程 及其水文生态效应

陈喜 张志才 容丽 束龙仓 阎长虹 苏维词 石朋 著



科学出版社

西南喀斯特地区水循环过程 及其水文生态效应

陈 喜 张志才 容 丽 束龙仓 著
阎长虹 苏维词 石 朋

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应为研究核心,分析西南典型喀斯特流域地貌、地质及水文地质、植被等特征。通过对典型小流域内土体基本理化性质、点位观测及试验、枯季流量退水规律分析,定量给出典型喀斯特地区土壤及岩溶裂隙水文地质参数,提出表层岩溶带定量表征方法及产汇流计算模式,揭示不同喀斯特生态环境区降水、土壤水、地表水及地下水相互转化机制,建立描述降水-径流响应的统计模型及概念性水文模型、描述植被-土壤及岩石裂隙-水文相互作用的分布式水文模型。采用同位素分析方法,确定喀斯特流域径流组成及植物水分来源和水分利用策略。采用水文观测试验、植被耗水测定及分布式水文模型计算等手段,确定了不同地貌形态、石漠化程度、小生境特征及植被生长阶段下的植物生态需水量。采用统计分析与水文模型相结合的方法,评估气候变化及人类活动影响下的流域生态水文效应。

本书可供水文学、水文地质学、生态水文学等学科研究人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西南喀斯特地区水循环过程及其水文生态效应/陈喜等著. —北京:科学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-03-040013-0

I. ①西… II. ①陈… III. ①喀斯特地区-水循环-关系-水文环境-生态效应-研究-西南地区 IV. ①P339②X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 042066 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:21 1/4

字数:413 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

西南喀斯特地区面积约 54 万 km^2 , 包括以贵州为中心的桂、滇、川、湘、鄂、粤、赣、渝八省(市、区), 在全球三大喀斯特集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大, 是青藏高原隆起在南亚大陆亚热带气候区形成的一个海拔梯度大、地势格局复杂、生态脆弱的独特环境单元。该地区山地面积大, 降水丰沛, 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带。同时该地区居住着 1 亿多人口、48 个民族, 贫困人口相对集中, 人地矛盾非常突出。目前不同程度石漠化土地面积达 17 万 km^2 , 占该区喀斯特面积的 31%, 近 2000 万人的生存环境受到严重威胁。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。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》把“岩溶生态脆弱区生态系统的动态监测技术、生态保护及恢复技术”作为优先主题, “人类活动对地球系统的影响机制”、“复杂系统、灾变形成及其预测控制”作为基础研究科学前沿问题。

2006~2010 年以我作为首席科学家开展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”(2006CB403200), 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, 从研究喀斯特山地石漠化过程机理、驱动力和时空变化出发, 以岩石—土壤—水—生物相互作用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、生态系统退化的生物地球化学作用, 研究喀斯特环境中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, 建立喀斯特退化和石漠化生态系统的修复与优化调控的理论体系。

该书主要内容为该项目第四课题“喀斯特地区水循环动力过程及其水文生态效应”及国家自然科学基金重点项目“西南喀斯特流域水文变异性及生态水文过程耦合模拟研究”的成果, 通过对典型喀斯特流域不同生境区大气降水、土壤水及表层岩溶带裂隙水、深层地下水之间转化规律, 以及植被蒸散发机理研究, 揭示喀斯特流域水循环特征及其与生态系统作用机制、植物水分利用来源及耗水(需水)机理, 构建喀斯特流域水文模型及生态水文模型, 定量评估石漠化过程的生态水

文效应。研究成果为揭示项目总体目标中水土流失的水动力机制,生态系统退化/恢复过程中水分作用,喀斯特生态系统适应性修复的水资源调控措施奠定基础。

该书主要作者为我国地质、水文地质、水文学、生态学等领域的研究骨干,该书研究成果中有关区域水文地质特征,特别是土壤和表层岩溶带裂隙发育特征及滞蓄水分能力分析成果,为增强该地区水循环规律的认识及水资源定量评估提供分析基础;主要优势植物的生态耗水量和生态需水量分析计算成果,以及不同石漠化等级区主要植物水分利用来源和利用策略,为石漠化治理及适应性生态系统调控提供科学依据;喀斯特流域产汇流规律研究成果增强了对区域雨洪过程形成规律的认识;建立的流域水文模型及生态水文模型提高了对气候变化及人类活动影响下水文过程演变的预测能力,也为水资源开发利用的定量评估和生态环境效应分析提供了科学支撑。由于喀斯特地区水循环十分复杂,目前的工作不可能对该领域所有问题都给出圆满解决,一些研究成果还在不断探索阶段,但该书的研究成果作为喀斯特生态水文学研究的主要代表性成果之一,将进一步促进我国喀斯特生态环境科学研究的学科交叉和科学问题研究的系统深入。喀斯特地区水文和生态系统演化之间的关系涉及喀斯特系统生物圈、水圈、岩石圈、土壤圈和大气圈的相互作用,是一个综合、复杂而系统的科学问题,需要广大研究工作者长期坚持和开拓创新地去进行研究,为推动我国喀斯特地区生态水文科学发展及社会经济发展做出科学贡献。



中国科学院院士

2014年1月

前 言

全球喀斯特面积约占陆地面积的 12%，中国喀斯特地区分布面积达 90 万 km^2 以上，接近国土面积的 1/10，主要集中分布在以贵州为“中心”的西南地区，包括广西、云南、四川、湖南、湖北、广东、江西、重庆的西南地区，出露面积约 54 万 km^2 。西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中连片分布区中面积最大、喀斯特作用最强烈、喀斯特地质景观类型最多、生态环境最复杂、人地矛盾最突出的地区。在亚热带地区喀斯特强烈发育的自然环境背景下，受人为活动的干扰破坏，造成了土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、生产力严重下降的土地退化现象，即石漠化现象。随着石漠化程度的加强，裸岩的分离度逐渐增加，斑块面积逐渐增大，草坡、灌丛、林地的分离度逐渐增加，伴随着西南地区近年来干旱少雨的气候条件，对水文生态过程产生诸多不利影响。

喀斯特地貌、土壤、裂隙及地表、地下水系控制产汇流过程及地表水与地下水转化。由于表层岩溶带裂隙率高、渗透性好、蓄水容量大，地表径流只出现在连续降水且降水强度极大的降水过程；大部分降水入渗到浅层岩溶带含水层，可形成表层岩溶泉，浅层岩溶带与下部管道流相连接，以地下径流形式汇集到流域出口断面。落水洞等岩溶洼地往往是地表水直接汇集进入地下水系的通道。喀斯特流域这种地表、地下二元结构增加了水文循环及生态水文连接的复杂性。从石漠化的水文生态效应来看，石漠化环境导致土壤涵养水分能力降低，表土层可供植物利用水分减少，雨洪径流暴涨、暴落，易形成雨季洪涝，旱季断流无水，水土流失/漏失加重，水资源开发利用难度加大。

不同喀斯特生态环境区以水为纽带的大气—水—土壤/岩石裂隙—生物等界面水分循环规律及其水文生态效应是石漠化治理及生态系统调控的重要基础。本书选择典型喀斯特流域分析水文地质特征及地表、地下二元水动力过程，研究土壤、浅层岩溶带水文地质参数的定量分析方法及水分时空变化特征，建立植被—土壤/岩溶裂隙水分的耦合方法，发展喀斯特流域生态水文模型，定量评估气候变化及人类活动影响下喀斯特流域水文时空变异特征。

本书共 8 章：第 1 章介绍西南喀斯特典型区概况及生态环境特征；第 2 章介绍喀斯特区水文地质参数及生态水文实验；第 3 章介绍喀斯特流域降水-径流响应统计分析模型；第 4 章介绍喀斯特流域概念性水文模型及应用；第 5 章介绍反映植被-土壤、裂隙-水文相互作用的喀斯特流域分布式水文模型及其在典型流域的应用；第 6 章介绍喀斯特流域水源划分及植物水分利用的同位素分析方法；第 7 章介

绍不同喀斯特生态环境区植物可利用水资源量时空分布规律及典型小流域生态需水计算方法;第8章介绍西南喀斯特地区水循环变化特征及气候变化的水文效应。

本书的主要内容是基于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”(2006CB403200)第四课题“喀斯特地区水循环动力过程及其水文生态效应”(2006CB403204)及国家自然科学基金重点项目“西南喀斯特流域水文变异性及生态水文过程耦合模拟研究”的研究成果。课题由本书作者河海大学陈喜教授负责,专题负责人有南京大学阎长虹教授、贵州省喀斯特资源环境与发展研究中心苏维词研究员、中国科学院地球化学研究所容丽教授。参与该课题研究的骨干成员还有河海大学束龙仓教授、张志才副教授、石朋副教授及数名博士生、硕士生,他们均对课题研究及本书的顺利出版做出重要贡献。本书研究成果还得到国家自然科学基金重点项目“西南喀斯特流域水文变异性及生态水文过程耦合模拟研究”(40930635)、国家自然科学基金青年基金“西南喀斯特坡地产生汇流过程及表层岩溶泉流量变化的水动力机制研究”(41101018)、“西南岩溶流域产生汇流规律的分布式模拟方法研究(41001011)”的资助。

本书研究成果得到“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”(2006CB403200)首席科学家刘丛强院士的指导和帮助,得到中国科学院地球化学研究所、贵州省科学技术厅普定岩溶地质与生态研究综合试验站王世杰研究员、彭韬博士,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员等的大力支持,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年12月

目 录

序

前言

第 1 章 西南喀斯特典型区概况及生态环境特征	1
1.1 引言	1
1.2 典型研究区概况	2
1.2.1 贵州省	2
1.2.2 乌江流域	3
1.2.3 后寨河流域	4
1.2.4 陈旗流域	5
1.2.5 花江峡谷	7
1.2.6 荔波自然保护区	7
1.3 水文地质特征	8
1.3.1 普定岩溶地区水文地质特征	8
1.3.2 花江岩溶地区水文地质特征	10
1.3.3 荔波岩溶地区水文地质特征	14
1.4 生态环境特征	18
1.4.1 植物的选择性生长	18
1.4.2 土壤的脆弱性	20
1.4.3 水土资源的不平衡	21
1.4.4 表层岩溶与生态环境的相互关系	21
第 2 章 喀斯特区水文地质参数及生态水文实验	22
2.1 引言	22
2.2 土壤入渗试验	22
2.2.1 Guelph 入渗仪入渗试验	22
2.2.2 单环变水头入渗试验	24
2.3 表层岩溶带的水文地质特征	27
2.3.1 表层岩溶带	27
2.3.2 表层岩溶带裂隙率的测定	29
2.3.3 表层岩溶带发育深度及受地形的影响	31
2.3.4 表层岩溶带裂隙渗透系数测定	37

2.4	岩溶裂隙入渗试验及数值模拟反求渗透系数	38
2.4.1	野外裂隙注水入渗试验	38
2.4.2	数值模拟原理	39
2.4.3	数值模型构建与裂隙水文地质参数推求	39
2.4.4	不同裂隙组合情形下入渗水流模拟	40
2.5	岩溶含水层抽水试验	42
2.5.1	等效多孔介质井流方程	42
2.5.2	双重介质井流方程	43
2.5.3	抽水试验	44
2.5.4	水文地质参数推求结果分析	45
2.6	基于流量衰减过程的渗透系数推求	48
2.6.1	通过衰减系数推求含水层渗透系数	48
2.6.2	基于 Brutsaert 方法的渗透系数推求	52
2.7	喀斯特小流域(陈旗)生态水文观测	57
2.7.1	不同生境区气象、水文观测	57
2.7.2	不同植被覆盖区的气象、水文变化特征	59
2.7.3	不同生境区土壤水分测定及变化特征分析	62
第3章	喀斯特流域降水-径流响应统计分析模型	71
3.1	引言	71
3.2	喀斯特流域降水-径流响应特征分析	72
3.2.1	研究区域和观测资料	72
3.2.2	时间序列分析方法	76
3.2.3	岩溶泉降水-径流响应分析	79
3.3	喀斯特流域降水-径流响应模拟	85
3.3.1	多元线性回归模型	85
3.3.2	人工神经网络模型	90
3.4	喀斯特流域枯季径流分析	101
3.4.1	枯季径流分析方法	102
3.4.2	衰减系数区域化分析	106
第4章	喀斯特流域概念性水文模型及应用	113
4.1	引言	113
4.2	喀斯特流域月水文模型	114
4.2.1	喀斯特流域径流形成过程	114
4.2.2	模型原理及计算方式	114
4.2.3	模型参数优化方法	124

4.2.4 实例应用	125
4.3 喀斯特流域日水文模型	136
4.3.1 模型结构	136
4.3.2 模型原理	137
4.3.3 实例应用	141
第5章 喀斯特流域分布式水文模型及应用	152
5.1 引言	152
5.2 喀斯特流域分布式水文模型概述	152
5.2.1 喀斯特含水层特征	152
5.2.2 喀斯特流域多重水流运动	155
5.2.3 多重介质含水层水流计算模型概述	160
5.2.4 喀斯特流域分布式水文模型建模思路	161
5.3 喀斯特流域多重水流计算及分布式水文模型	163
5.3.1 基于连续介质的分布式土壤-植被-水文模型	163
5.3.2 基于多重介质等效体的分布式水文模型	172
5.4 喀斯特流域水文过程模拟	178
5.4.1 模型资料	179
5.4.2 陈旗流域裂隙生成	184
5.4.3 模型参数率定与验证	185
5.4.4 岩石裂隙对水文过程的影响分析	189
5.5 岩溶地貌对水文过程影响的模拟	194
5.5.1 模型资料	194
5.5.2 参数率定与模型验证	200
5.5.3 落水洞对汇流过程的影响	202
5.5.4 深层径流带对地下河径流过程的影响	203
5.6 喀斯特流域地下水数值模拟	204
5.6.1 基于等效连续介质的 MODFLOW 模型	204
5.6.2 基本原理及数值求解方法	205
5.6.3 典型喀斯特流域地下水数值模拟	205
5.6.4 后寨河流域模型构建	205
5.6.5 模型识别与验证结果分析	211
5.6.6 模型参数灵敏度分析	215
第6章 喀斯特流域水源划分及植物水分利用的同位素分析方法	218
6.1 引言	218
6.2 基于稳定同位素和水化学成分的流域径流划分	220

6.2.1	原理与方法	220
6.2.2	采样与测试	221
6.2.3	氢、氧同位素关系及水化学动态变化	221
6.3	喀斯特地区土壤、植被水分同位素测定	226
6.3.1	样品采集	226
6.3.2	野外试验	227
6.3.3	室内试验	228
6.4	喀斯特地区植物水分来源计算及影响因素	230
6.4.1	水分来源比例的测算方法	230
6.4.2	测算结果分析	231
第7章	喀斯特流域植被耗水量及生态需水量估算	249
7.1	引言	249
7.2	喀斯特流域典型植被耗水量的测定与计算	249
7.2.1	花江石漠化生态修复样区典型建群植物——花椒林地蒸腾耗水量	249
7.2.2	普定样区优势适生树种的生态耗水量	254
7.2.3	花江喀斯特峡谷石漠化地区花椒林地最大与最小生态需水量	256
7.3	基于分布式水文模型的喀斯特流域植被耗水量计算	258
7.3.1	流域植被散发计算	258
7.3.2	植被散发量影响因素	260
7.3.3	植被可利用水资源量计算	263
第8章	西南喀斯特地区水循环变化特征及气候变化的水文效应	265
8.1	引言	265
8.2	贵州省水文要素变化特征	265
8.2.1	贵州省降水变化特征	265
8.2.2	降水集中度及其变化特征	270
8.2.3	气候变化对潜在蒸散发影响的分析	274
8.2.4	贵州省径流变化特征分析	283
8.2.5	贵州省年径流系数变化及影响因素分析	290
8.3	乌江流域水循环要素变化特征	302
8.3.1	乌江流域降水、气温变化特征	302
8.3.2	乌江流域蒸散发量变化特征	304
8.4	气候变化的水文效应评估	309
8.4.1	未来气候变化趋势分析	309
8.4.2	未来气候变化对潜在蒸散发影响的分析	311
8.4.3	气候变化对区域径流的影响	313
参考文献		316

第 1 章 西南喀斯特典型区概况及生态环境特征

1.1 引言

喀斯特地貌在全世界分布很广,面积近 2200 万 km^2 ,约占陆地面积的 12%,居住人口约 10 亿,主要分布区有:南斯拉夫的迪纳拉山区,法国的中央高原,俄罗斯的乌拉尔山区,澳大利亚大陆南部,美国的肯塔基州和印第安纳州,古巴、牙买加和越南北部地区等。集中连片的喀斯特地貌主要分布在欧洲中南部、北美东部和中国西南地区。中国碳酸盐类岩石分布面积约 125 万 km^2 ,主要分布在两个地区,其一是北方的山西高原及相邻地区;其二是中国西南地区,以广西、贵州、云南等地分布最为集中,是世界上喀斯特地貌发育最典型的地区之一。

西南喀斯特地区是包括云南、贵州、四川、广西、重庆在内的我国最大的裸露喀斯特分布区(图 1.1),面积约 54 万 km^2 。该区域地处长江、珠江中上游,是我国重要的生态屏障区,也是我国典型的“老少边穷”地区。该区域有 48 个民族,近 3000 万少数民族人口,占全国少数民族总人口的 28%。该区域又是经济欠发达地区,有 152 个国家级贫困县,贫困人口超过 1000 万人。该区域还是我国重要的能源基地,水电和火电在我国能源格局中占有重要地位。此外,其还是生物多样性保护的重要区域^[1]。

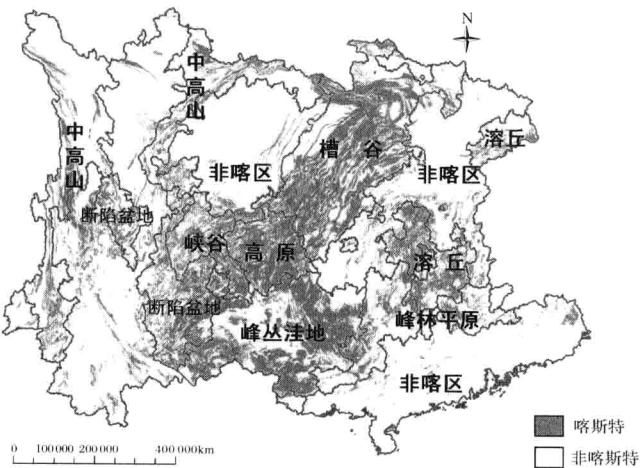


图 1.1 西南喀斯特地区

不同喀斯特生态环境区(或流域)具有不同的地形、地貌、地质(或水文地质)和生态环境等特征,其对区域生态水文过程的影响也存在显著差异。因此,选择典型代表性生态环境区进行强化观测与科学研究,是研究西南喀斯特地区水动力过程、水文生态效应及石漠化防治与环境治理的基础和必由之路。

本书选择贵州省和乌江流域思南站以上区域开展区域气象、水文、水文地质、水资源特征及其变化趋势研究。在贵州省内选择的典型研究区包括:位于中部高原面上的普定岩溶实验区(后寨河流域和陈旗流域)、位于峡谷区的花江石漠化综合试验区(花江)及位于贵州南部斜坡地带的茂兰国家级自然保护区缓冲区的拉桥片区(荔波)。通过对典型生态环境区地貌、地质(或水文地质)及生态系统特征分析,为揭示喀斯特地区地表、地下双重结构水文地质等特征及其在水文与生态系统中的控制作用提供基础。

1.2 典型研究区概况

1.2.1 贵州省

贵州省位于中国西南部,地处世界三大喀斯特集中分布区之一的东亚片区中心,是中国喀斯特分布面积最大、发育最复杂的一个省区(图 1.2)。其喀斯特分布面积占全省面积的 85%,其中出露的碳酸盐岩面积达 15 万 km^2 , 占全省土地总面积的 73.6%。喀斯特地貌发育强烈,山地和丘陵面积占全省土地面积的 92.5%,是全国唯一没有平原支撑的山区省份。土壤类型多样,既有黄壤、红壤、棕壤等地带性土壤,又广泛分布石灰土、石质土等岩性土。不同土壤类型的理化性质不同,抗蚀性能不同,加之开发利用方式的差异,致使不同的土壤类型分布区遭受侵蚀的程度各异,表现出不同的生态类型景观。贵州省地处亚热带湿润季风气候区,多年平均降水量 1100~1300mm,温暖湿润的气候类型和复杂多样的条件给多种植物提供了良好的生长环境,全省植物种类繁多,物种资源丰富。据统计,省内约有种子植物和蕨类植物 250 科 1543 属 5539 种。

由于受气候、地质、地貌、水文等自然因素的作用,加之人类不合理的开发活动影响,贵州省山区水土流失严重。全省超过 1/3 的喀斯特地区已经存在不同程度石漠化问题,中度以上石漠化面积为 15 441.60 km^2 ,治理和恢复的难度大。潜在石漠化面积为 34 026.58 km^2 , 占全省总面积的 19.31%,总体具有分布范围广、面积大、石漠化类型多样、空间分布不均、石漠化程度严重的特征。因此,研究该地区生态水文过程的时空演变趋势、特征及驱动因素对认识区域水文、生态环境及石漠化过程变化规律具有重要作用。

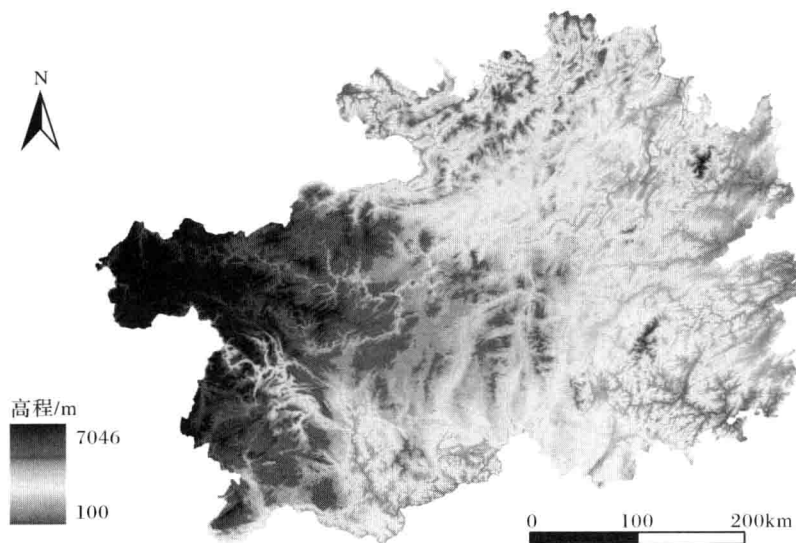


图 1.2 贵州省地形

1.2.2 乌江流域

乌江起源于云贵高原,是长江最大的支流之一,河长 874km,贵州省内流域面积为66 849km²。乌江流域思南站以上流域在贵州省境内部分(图 1.3)的面积为 50 791km²,约占乌江流域面积的 75.98%,位于东经 104°19'5"~ 108°34'59"、北纬 26°9'6"~ 28°14'4"。思南流域内西高东北低,海拔一般为 400~2000m,最高达到 2854m,最低 349m。研究区地处亚热带湿润季风气候,年平均气温为9~17℃;冬季降水较少,夏季降水较多,其中 6~9 月总降水量为 450~850mm,占该地区年平均降水量的 50%;枯季从当年的 10 月开始,到翌年的 4 月结束。

乌江流域思南站以上流域主要位于亚热带喀斯特高原山地地区,属云贵高原的东延部分。由于碳酸盐岩分布广泛,上游主要是二叠纪和三叠纪碳酸盐岩;中游广泛分布二叠纪和三叠纪石灰岩及灰岩白云岩互层岩类;下游主要是碳酸盐岩类,并混有白垩系的紫色砂页岩,前震旦系的板岩,中、上三叠系的砂岩、粉砂岩等。受近期喜马拉雅造山运动的强烈构造抬升及古近纪和新近纪以来受到热带、亚热带湿润气候环境下河流侵蚀作用的影响,形成了显著的喀斯特高原-峡谷结构,即该结构是由地貌类型、发育过程完全不同的高原区和峡谷区两大单元有机组合而成的。

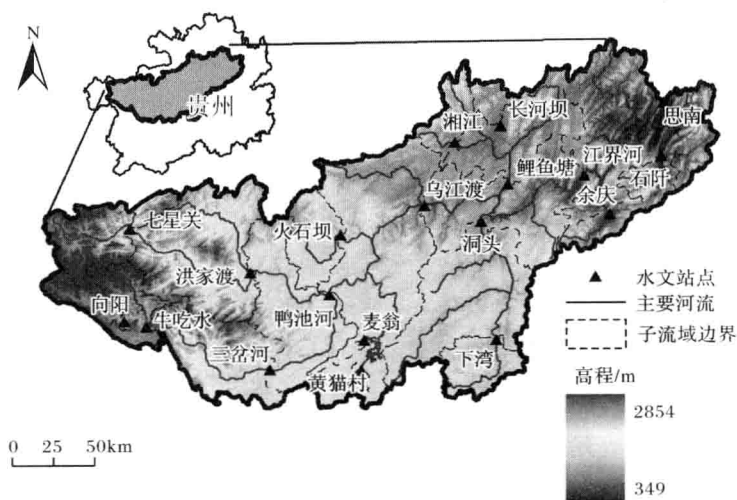


图 1.3 乌江流域思南站以上区域数字高程模型、水系及水文站点分布

1.2.3 后寨河流域

普定后寨河流域位于贵州省普定县城以南,面积 80.65km^2 ,流域地势东南高、西北低,海拔为 1300m 左右,属于贵州高原分水岭的岩溶地貌水文特征典型区,地面较平缓。区内气候温和湿润,多年平均降水量为 1380mm , $5\sim 10$ 月雨季降水量占全年降水量的 80% 以上。后寨河流域由 3 条地表河(灯盏、号营、后寨河)和一条地下暗河(打油寨-冒水坑)组成(图 1.4)。地表干支流常年处于干枯状态,只在汛期起排洪作用,雨季灯盏、号营河汇流至青山水库,青山水库放水部分至后寨河,大部分雨洪径流经打油寨-冒水坑地下暗河流出。地下水丰富,冒水坑地下暗河最大流量达 $3.7\text{m}^3/\text{s}$ 。

受岩性、地质构造和新构造运动的影响,后寨河流域内地貌结构复杂。由于碳酸盐岩层广泛分布,后寨河流域内岩溶地貌发育广泛,主要地貌结构有峰丛-洼地和峰林-盆地两种地貌类型。

峰丛-洼地类型主要分布在后寨河流域的东部和东北部,是后寨地下河系源头区。峰丛顶面高程为 $1400\sim 1565\text{m}$,坡面坡度为 $50^\circ\sim 60^\circ$ 。峰丛表面溶沟、溶槽发育,还常常发育溶洞,峰丛之间常常是洼地,洼地海拔约为 1360m ,正负地形相对高差小于 100m 。洼地内蚀余堆积少,土层薄并常有落水洞、漏斗发育,基岩大面积裸露。由于有大量发育的溶蚀裂隙存在,当大气降水时,水流被溶隙迅速吸收转入地下,水流垂直入渗较强,地下水埋深达 $10\sim 30\text{m}$ 。

峰林-盆地类型主要分布在后寨河流域的西部和西北部,盆地四周被峰林所环绕(图 1.5),西部盆地高程为 $1220\sim 1260\text{m}$,由几个大型溶蚀洼地合并而成,其间有

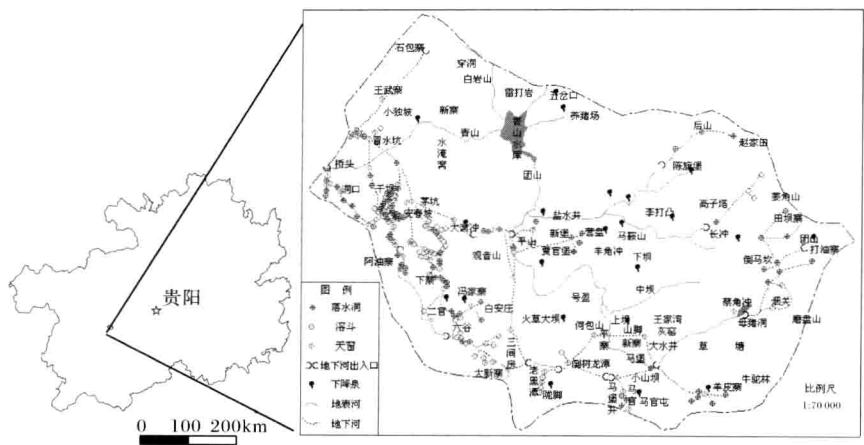


图 1.4 后寨河流域水系分布

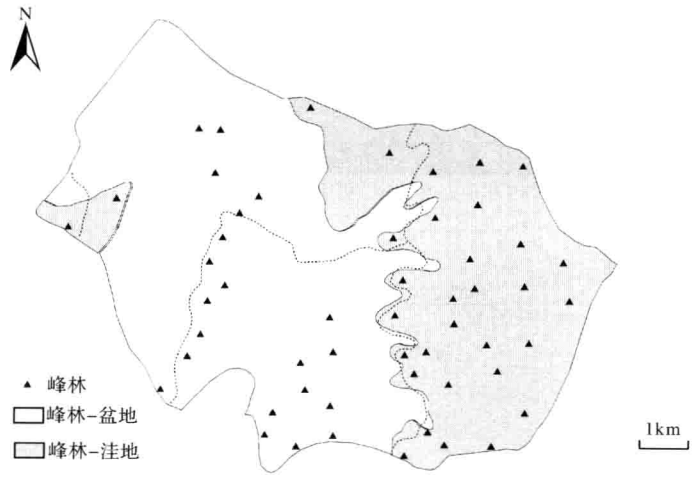


图 1.5 后寨河流域地貌组合及水文地貌分区

明暗相间河流串联。盆地边缘为峰林,盆地内土层较厚,地面较平坦。洼地、漏斗、地下河天窗、落水洞等星罗棋布。此外,尚有台地发育,大多数台地上覆盖黄土,如黄土坡、干坝就属此类。

1.2.4 陈旗流域

陈旗流域(北纬 $26^{\circ}15'36''\sim 26^{\circ}15'56''$ 、东经 $105^{\circ}43'30''\sim 105^{\circ}44'42''$)位于后寨河流域内,多年年平均降水量为 1336mm。年平均气温 14.2°C ,7 月最高,平均气温 22.6°C ;1 月最低,平均气温 4.1°C 。具有贵州典型的峰丛山体、峰丛洼地地貌

及岩溶水文地质特征。由于岩溶发育,岩层裸露现象严重,降水一般经过溶隙补给岩溶地下水,径流经地下裂隙管道在流域出口以泉水形式排泄。

陈旗流域以三叠系关岭组第二段第二、三亚段厚层灰岩、薄层灰岩、夹泥灰岩和少量白云质灰岩为主,属于可溶性岩石,风化过程以溶蚀为主,形成的土层主要为碳酸盐岩土。峰丛山体上部为关岭组地层,其上部为厚层灰岩,中部为中厚层灰岩与白云岩互层,下部为泥岩及泥灰岩;关岭组下部为永宁镇组地层,少有出露,基本被第四纪地层和植被覆盖。第四系主要分布于河谷阶地及溶蚀谷地、洼地中,主要作为耕地使用(图 1.6)。

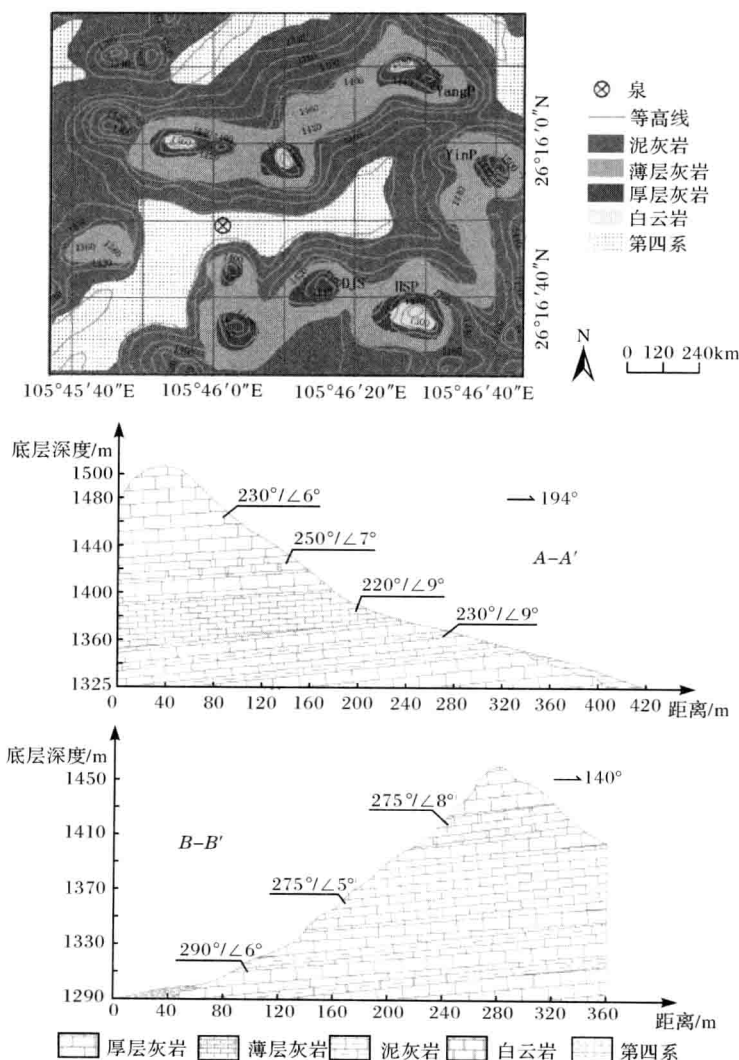


图 1.6 研究区地形及地质^[2]