

云贵高原

典型陆地

生态系统研究(三)

喀斯特植物生态、景观格局 与水土流失

主 编 王震洪

副主编 李 菊 饶 静 余 丹

方 红 陈谋会 孙丽娜

于俊峰



科学出版社

云贵高原典型陆地生态系统研究(三)

——喀斯特植物生态、景观格局与水土流失

主 编 王震洪

副主编 李 菊 饶 静 余 丹 方 红

陈谋会 孙丽娜 于俊峰



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

云贵高原区域生态系统与相邻的西南纵向岭谷区、青藏高原、四川盆地、长江中下游平原、东南红壤丘陵区、珠江中下游区域生态系统相比,在地形、气候、地球化学、人类活动方面具有显著差异。在典型陆地生态系统的长期演化中,植物生态和景观格局对地形、气候、地球化学、人类活动方面具有比较独特的响应性变化,并对水土流失等地表物质过程产生了不同的影响。本书以云贵高原典型陆地生态系统为研究对象,利用植物生态学方法,探讨了喀斯特阔叶林重要树种叶凋落-分解与凋落层维持关系、喀斯特阔叶林重要树种根系分泌物与土壤抗蚀性关系、不同土地利用格局下演化形成的土壤的抗蚀性,利用景观生态学理论、“3S”技术研究了典型区域喀斯特植被景观格局对地形地貌的响应、昆明-贵阳典型城市景观格局及驱动力、红枫湖流域水土流失与景观格局关系、基于 SWAT 模型的猫跳河流域水土流失及数字流域系统等。

本书可供生态学、水土保持、林学、土地利用规划、环境科学等研究领域的科技人员和管理者参考。

图书在版编目(CIP)数据

云贵高原典型陆地生态系统研究(三):喀斯特植物生态、景观格局与水土流失/王震洪主编. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-039486-6

I. ①云… II. ①王… III. ①云贵高原-陆地-生态系统-研究
IV. ①P942.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 314865 号

责任编辑:马俊 刘晶 / 责任校对:刘小梅
责任印制:赵德静 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张:23 3/4 插页:8

字数:587 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

Typical terrestrial ecosystems in Yun-Gui plateau in China (Ⅲ)
—— karst plant ecology, landscape pattern and soil erosion

Editor-in-Chief: Zhenhong Wang

Vice Editors-in-Chief: Ju Li, Jing Rao, Dan Yu, Hong Fang, Mouhui Cheng,
Lina Sun, Junfeng Yu

Science Press
Beijing

前言

在云贵高原,河流深切割、岩溶过程、独特气候和人-地关系四大过程的叠加作用,对陆地生态系统各种生态过程产生了深远的影响。

①在贵州境内,高原面海拔一般在1200m左右,在云南境内,海拔一般在1800m左右。但在云贵高原北部、南部、西部和东部的河流,如川江、南盘江、红河、湘江等,河床海拔一般在500m以下,这些河流及支流延伸到高原腹地并形成深切割,使高原形成了许多山地-谷地景观。切割较浅的区域,高原面保存完整,形成了许多丘陵盆地。②云贵高原南部、东部岩溶发育强烈。在高原面保存完整的区域,平坝、峰丛、洼地、漏斗地形景观占优势,在河流切割较深的区域,石灰岩山地和峡谷景观占优势。在石灰岩峰丛、洼地、漏斗、山地、峡谷地形表面,凹槽、石芽、石林、落水洞等喀斯特微地形十分普遍。③云贵高原整体属亚热带季风气候,但在高原西部的云南,冬季多晴天、干燥而温暖,夏季降水丰富,湿润凉爽,气温季节性变化较小,日变化较大;在高原东部的贵州,夏天降水较多,气温较高,冬天阴雨天气多,较寒冷。④在云贵高原生活着不同民族,不同民族生产方式不同,高原生态环境的复杂多样性-民族多样性-人文地理环境多样性-经济文化多样性规律十分明显。上述4个过程明显影响着云贵高原典型陆地生态系统的植物生态、景观格局、水土流失及其它它们之间的关系。

在植物生态方面,由于长江、珠江、洞庭湖水系、云贵高原西部诸河流及其支流的深切割作用,在云贵高原上形成了不同海拔级别的陆地生态系统,植被分布的垂直地带性比较明显,植被类型和物种组成多种多样,对水土流失具有不同的调控作用。由于温度和降雨的差异,云贵高原西部的云南,地带性植被主要是半湿润常绿阔叶林,由于自然和人类干扰,形成云南松林、云南松针阔混交林、次生灌丛、人工林等不同退化类型或次生演替阶段;在云贵高原东部的贵州,区域稳定的植被主要是常绿阔叶林,由于自然和人类干扰,形成的退化类型和次生演替阶段主要是次生性常绿阔叶林、灌丛、荒山等,在土层较厚的区域分布着马尾松林。半湿润常绿阔叶林对应于常绿阔叶林,云南松林对应于马尾松林是植被适应于云贵高原东西部不同气候条件的地理替代类型。在云贵高原不同区域河流深切割和气候效应的基础上,如果陆地生态系统属于岩溶地区,峰丛、洼地、漏斗、凹槽、石芽、石林、落水洞等喀斯特微地形和土层不连续并瘠薄的特点,植被类型和物种组成又发生了分异。由于植被类型、物种组成的差异,植物对水土流失的作用是不同的,这使陆地生态系统水土流失具有鲜明的特点。

过去的工作已开展了植被类型、覆盖、枯落层、个体密度、植物多样性对径流、土壤侵蚀的调控(Lal, 1988; Morgan, 1996; Gillieson et al., 1996; 余新晓, 2006; 张信宝等, 2007; 王震洪等, 2006, 2011)、不同植被类型、树种对降雨再分配及降雨动能的调控(蒋有绪, 1996; Asdak et al., 1998; Liu, 1998; Aboal et al., 1999)、植被类型对土壤抗蚀性的调控(高维森, 1992; 李勇, 1995; 刘国彬, 1998)、植被根系对固土力学性质的调控(Gray, 1995)等。总结这些研究工作,有一个值得注意的特

点是：植被作为群体从“空中-地表-地下”调控土壤水力侵蚀的机理研究比较充分（刘定辉和李勇，2003；余新晓等，2006；刘世荣等，1996；张志强等，2001；周国逸，2002），但是从植物学水平上，如植物形态、生理、凋落方面研究植物生态过程调控土壤水力侵蚀的机理相当少（李勇，1995；蒋有绪，1996；程洪等，2006）。

研究表明，植被调控土壤水力侵蚀是通过小尺度的植物生态学过程从空中、地表和地下调控土壤水力侵蚀为基础的。在“空中”，植物生活型、叶片质地、叶表面有无蜡质、疏水角质、表皮毛、枝、干表面的粗糙程度等植物学特征会影响雨水和植物表面的动力学作用；叶子大小、着生方式、密度，枝的空间伸展，植物（树）形状等植物形态特征会影响植被覆盖和枝叶密度，调控降雨截留和动能削减（王震洪等，2011，2012）。在“地表”，凋落物对降雨截留-动能削减、径流入渗、土壤抗蚀性的调控起着非常重要的作用（刘国彬，1998；郑粉丽等，2003）。凋落物中叶占了生物量的大部分（一般大约是75%），不同植物由于遗传差异，叶凋落量和速率差别很大（韩冰等，1994；Reich et al.，1992；刘增文，2002），不同植物由于叶中各种化学成分的差异，落叶分解速率在种间也不同（Sariyildiz and Aanderson，2003；郭剑芬等，2006）。因此，不同植物叶凋落-分解速率不同会对森林凋落层的维持产生不同的贡献，进一步影响着水土流失。在“地下”，不同树种根系生理生化效应的差异，会引起土壤物理化学性质的变化，改变土壤抗蚀性（王震洪等，2001）。进一步研究显示，不同树种根系生理生化效应通过根分泌物来实现。根分泌物是各种有机酸、糖类、生长素、酶类、脂类等，它们不仅直接改变土壤理化性质，还影响微生物活动，使土壤生物学过程发生变化（刘子雄等，2005；Kuzakov et al.，2007）。因为不同植物根系产生的分泌物种类和浓度不同，土壤在不同根分泌物的作用下抗蚀性可能会产生差异性。但是，人们并不了解植物群体中每种植物根系产生的分泌物种类-浓度、不同分泌物种类-浓度与土壤性质和抗蚀性之间的关系？主导土壤抗蚀性效应的分泌物种类-浓度是什么？也不了解每种植物叶凋落-分解速率对整个凋落层维持的贡献有多大？不了解不同物种叶凋落-分解的差异与土壤物理化学-生物学性质、土壤抗蚀性-渗透性的关系。解决这些问题似乎很简单，但由于群体水平上的研究方法难于应用于大量植物种个体的研究，使这些问题没有得到系统解决。

在景观格局方面，云贵高原河流深切割、岩溶过程、气候效应和人-地关系依次叠加，区域生态系统景观格局呈现了鲜明特征，并影响区域生态系统的结构、维持和功能。首先在大地构造形成的完整高原面上，在非岩溶区，初始景观是丘陵湖盆景观。该景观以低丘、缓丘、平坝、湖泊、台地为主；在岩溶区初始景观是丘陵岩溶景观，该景观以峰丛、洼地、漏斗、台地地形为主。随着各河流从云贵高原周围逐步向中心地带的切割作用，逐步形成了山地-谷地二级景观，该景观主要是中山、宽谷、峡谷地形。如果山地-谷地景观形成于非岩溶区，山谷中发育着不同级别的侵蚀沟、崩岗、滑坡、泥石流沟，坡面则比较完整。如果山地-谷地景观形成于岩溶地区，各种岩溶过程的作用，山谷、坡面上形成不同大小的凹槽、石芽、石林、落水洞等，坡面比较破碎。在不同地区的二级景观水平上，由于气候差异，形成了不同的植被类型、物种组合和生态过程，发育了三级景观。在云贵高原上，不同的陆地生态系统，景观可能处于不同时间阶段，人们可以看到不同级别的景观。另外，由于人类大规模生产活动比已经存在的一级到三

级景观出现晚,人类对景观格局的影响是一种不断叠加到一级到三级景观上的过程。不同民族生产和生活方式对景观的干扰、适应和改造作用,使一级、二级、三级景观留下了不同的人类印记,并显示了复杂的人-地关系。

从全国看,自20世纪80年代初开始介绍景观生态学的概念、理论和方法以来,地理学、生态学、林学、农学等领域的研究人员对不同地区景观格局及生态学过程的研究给予了极大的关注。在基础理论和方法方面,傅伯杰、陈利顶、肖笃宁、李哈滨、李晓文、邬建国、李秀珍、邱扬、贺红士等学者对景观生态学的起源、发展、基础理论,如①时空尺度;②等级理论;③耗散结构与自组织理论;④空间异质性与景观格局;⑤缀块-廊道-基底模式;⑥岛屿生物地理学理论;⑦边缘效应与生态交错带;⑧复合种群理论;⑨景观连接度与渗透理论等主要理论作了系统论述,遥感技术、地理信息系统、景观指数、空间统计学方法、景观模型的建立等在不同的景观生态学研究作了应用。

在具体研究方面,上述学者和其他学者开展了城市景观空间格局、城郊和农业景观,包括城乡交错带和农林复合系统景观研究,分析了景观格局、土地利用格局的变化、人类活动对景观结构的影响,基于景观生态学理论和方法评价了土地生产力的现状与生产潜力,建立了景观动态预测模型等。例如,彭少麟探讨了森林景观中的边缘效应问题,马克明等对北京东灵山地区的森林景观格局、生物多样性、景观多样性进行的研究。在干旱区,主要集中在沙地景观格局和荒漠绿洲景观格局的研究上。沙地景观格局在时空尺度上都表现出很大的异质性,开展沙地景观格局动态研究对传统沙漠化机制研究是一个重要的补充。绿洲是干旱地区的一种特殊景观类型,它是干旱区生态环境最为敏感的部分,同时也是区域尺度上干旱区最大的人工干扰源,从事沙地(绿洲)景观格局的研究对揭示沙漠化的形成机理起到了明显的推动作用。在湿地景观的研究方面,最具代表性的是对辽河三角洲湿地景观的研究,包括对湿地景观格局及对养分去除功能的影响,以及运用景观生态决策评价支持系统,探索景观规划方案对丹顶鹤、黑嘴鸭等珍稀水禽的生境适宜性、生态承载力等方面的影响。

我国景观生态学研究发展是迅速的,但以下几个方面需要进一步关注:①过去的研究工作对东部平原、黄土高原、河口海岸地区、水网地区、中心城市的景格局和功能做了比较多的关注,云贵高原作为我国生态环境保护的重点地区,不同区域土地利用、植被景观、石漠化景观也曾做了一些研究工作,但总体研究工作还比较薄弱。特别是考虑地形特征、岩溶过程、气候效应和人-地关系依次叠加的景观格局、维持和过程没有系统研究,研究这些过程对景观格局的影响,可以揭示景观格局的形成和维持机制。②云贵高原地处长江、珠江上游,是两江的生态屏障,该区的水土流失和面源污染对当地和两江中下游水环境具有重要影响,有必要在景观生态学水平上通过景观格局的系统分析和刻画,揭示典型景观格局的维持机制以及典型流域景观格局与水土流失的关系。

2003年以来,在王震洪教授领导下获得了国家自然科学基金“西南岩溶区常绿阔叶林调控土壤水力侵蚀的植物学机理(40861015)”、贵州省科技攻关“乌江流域猫跳河数字流域系统研究”[黔科合SY字2008(3033)]、贵阳市创新人才基金项目“两湖一库数字流域系统研究(2008421)”、贵阳市科技局重点专项“两湖一库汇水区域农业面源污染治理技术研究与新农村建设示范(2009筑科农合同字第3-042号)”等项目的支持,选择云贵高原典型陆地生态系统,利用植被生态学、景观生态学、“3S”技术等

理论和方法,开展了云贵高原喀斯特阔叶林重要树种叶凋落-分解与凋落层维持、根系分泌物对土壤抗蚀性的影响、不同土地利用格局下重要土壤抗蚀性、植被景观格局对地形变化的响应、典型城市景观格局及驱动力、典型流域水土流失与景观格局关系及基于SWAT模型的流域水土流失及数字流域系统研究。

本书在王震洪教授指导下对上述问题进行总结,希望对云贵高原陆地生态系统研究有促进作用。第一章由陈谋会编写,第二章由方红编写,第三章由于俊峰编写,第四章由李菊编写,第五章由孙丽娜编写,第六章由饶静编写,第七章由余丹编写。全书分章节完成后由王震洪教授统稿。

王震洪

2013年1月13日

目 录

前言

第一章 喀斯特阔叶林重要树种叶凋落-分解与凋落层维持	1
1.1 研究意义	2
1.2 森林凋落物研究现状	3
1.3 本研究关注的科学问题	7
1.4 研究方法	8
1.5 叶生物量、叶残留量、叶子期望寿命和叶子凋落速率	14
1.6 凋落叶残留率、年分解率	26
1.7 讨论与结论	37
参考文献	42
第二章 喀斯特阔叶林重要树种根系分泌物对土壤抗蚀性的影响	47
2.1 研究的意义	48
2.2 国内外研究现状	49
2.3 本研究关注的科学问题	52
2.4 喀斯特阔叶林重要树种根系分泌物特征	53
2.5 添加根系分泌物对土壤抗蚀性的影响	79
2.6 根际土壤抗蚀性及其与根系分泌物的关系	85
2.7 根际土壤养分特征及其与土壤抗蚀性的关系	93
2.8 利用灰色关联分析评价不同树种根际效应	99
2.9 讨论与结论	104
参考文献	113
第三章 云贵高原不同土地利用格局下四种典型土壤抗蚀性	117
3.1 研究意义	118
3.2 研究进展	118
3.3 本研究关注的科学问题	125
3.4 不同土地利用格局下 4 种土壤抗蚀性多指标评价	125
3.5 不同土地利用格局下 4 种土壤类型抗蚀性综合指标评价	142
3.6 讨论和结论	153
参考文献	157
第四章 贵阳市花溪区植被景观格局对地形变化的响应	160
4.1 研究意义	161
4.2 国内外研究现状	162
4.3 本研究关注的科学问题	164
4.4 贵阳市花溪区植被景观格局特征	165

4.5 花溪区地形数量特征及其与植被景观格局的关系 182

4.6 讨论与结论 201

参考文献..... 205

第五章 贵阳-昆明城市典型区域景观格局及驱动力分析 208

5.1 研究意义 209

5.2 国内外研究现状 210

5.3 本研究关注的科学问题 214

5.4 贵阳-昆明土地利用景观格局特征 215

5.5 贵阳-昆明景观格局驱动力分析 235

5.6 讨论和结论 243

参考文献..... 249

第六章 基于“3S”技术的红枫湖流域水土流失与景观格局..... 252

6.1 研究意义 253

6.2 国内外研究现状 254

6.3 本研究关注的科学问题 256

6.4 红枫湖流域水土流失预测 257

6.5 红枫湖流域景观格局与水土流失关系 276

6.6 讨论与结论 295

参考文献..... 297

第七章 基于 SWAT 模型的猫跳河流域水土流失及数字流域系统 300

7.1 研究意义 301

7.2 国内外研究现状 303

7.3 本研究的技术路线 306

7.4 猫跳河 SWAT 模型及水土流失 306

7.5 猫跳河数字流域系统的网络实现 337

7.6 结论与讨论 367

参考文献..... 369

第一章 喀斯特阔叶林重要树种叶凋落-分解与凋落层维持

摘要 森林凋落层是森林生态系统垂直结构上的3个主要功能层之一,它在截留降水、防止土壤溅蚀、阻延地表径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲性等方面都具有重要意义。阔叶林是喀斯特地区顶极植物群落,叶作为凋落物的重要组成部分,它的凋落量和分解速率直接影响着森林凋落层维持。本研究从个体水平研究植物叶的凋落-分解与凋落层维持的关系。在水土流失轻微的喀斯特地区,选择喀斯特地区重要树种75种,确定标准木,实测各树种标准木冠幅、冠层叶生物量、相应树冠下凋落叶的年残留量、标准木生长地点的海拔、坡向;根据枝条上不同年份保留的叶子数调查,建立各树种叶生命表,计算凋落速率参数;测定新鲜凋落叶的初始化学指标,利用初始化学-凋落叶分解模型估测凋落叶的分解速率;通过偏相关分析、回归分析,了解凋落叶的残留量与冠层叶生物量、凋落速率及凋落叶分解速率的关系及凋落叶残留率与凋落速率、分解率、海拔、坡向的关系,建立凋落叶残留量与相关因子的关系数学模型,预测各树木凋落叶年残留量。研究表明,①49种常绿树种和26种落叶树种凋落叶残留量与冠层叶生物量显著相关,两者之间呈线性关系;常绿树种凋落叶残留量占冠层叶生物量的百分比主要在50%以上和30%以下,落叶树种主要为40%~60%,总体平均值为落叶树种大于常绿树种。②49种常绿阔叶树种叶平均期望寿命为0.7(牛皮桐 *Itea chinensis* var. *oblonga*)~2.25(细枝柃 *Eurya loquaiana*)年,为0.7~1.5年的占总数的77.55%,不同生活型植物叶寿命差异不显著;根据叶子的期望寿命统计得出19种树种叶子凋落速率等于1,30种小于1;都匀、贵阳、荔波三个地区研究的树种叶寿命差异不显著;常绿树种每年出生的叶子数为5~27片,其中茶树最少,为5片,映山红最多,为27片,各龄级出生叶子数差异不显著;叶子平均期望寿命与叶子的出生率、死亡率紧密相关。③凋落叶残留率与初始全氮、全磷、全钾呈负相关,与全碳、木质素、纤维素、单宁、淀粉呈正相关,与C/N、C/P、纤维素/N、纤维素/P、纤维素/K、单宁/N、单宁/P、淀粉/N、木质素/P、木质素/K、蛋白质/K均呈显著相关($P < 0.01$),与海拔呈正相关,与坡向相关性不显著。④凋落叶残留量与冠层叶子凋落速率呈极显著正相关,叶子凋落速率不同,对凋落层维持的贡献也不同;凋落叶残留量与冠层叶生物量之比大小顺序为凋落速率等于1的常绿树种(51%)>落叶树种(46%)>全部常绿树种(40%)>凋落速率小于1的常绿树种(35%)。⑤凋落叶残留量与叶分解速率呈负相关,相关系数为-0.472。其中常绿树种凋落叶残留量与叶分解率的相关系数为-0.366,落叶树种为-0.772。在分解率相等的情况下,常绿树种凋落叶的残留率较落叶树种略大。⑥凋落叶残留量与冠层叶生物量、凋落速率、分解速率、海拔进行多元曲线拟合,得到以下两个相关系数较高的方程: $y_{\text{落叶}} = 0.8853 + 0.440x_1 - 0.0252x_3 + 0.0003x_4$; $y_{\text{常绿}} = -0.5279 + 0.434x_1 + 0.0077x_2 - 0.0074x_3 + 0.0002x_4$,式中, x_1 为生物量, x_2 为叶子凋落速率, x_3 为凋落叶分解速率, x_4 为海拔, y 为凋落叶残留量。本研究工作建立了一种快速评估森林树木叶凋落速率的植物生态学方法,并利用这一方法

估计了喀斯特森林一些重要树种叶子凋落速率,结合凋落叶分解速率研究,认识了叶凋落-分解过程对喀斯特森林凋落物维持的影响。

关键词 喀斯特;阔叶林;叶子凋落速率;分解速率;化学指标;凋落层维持

1.1 研究意义

喀斯特(karst)是指具有溶解能力的水溶液对碳酸盐岩等可溶类岩石的溶蚀过程,以及由此产生的地貌等现象的总称(梁成华,2002)。喀斯特生态系统具有成土速度慢、土层薄且不连续、土壤胶体中有机质等黏着物含量不高,植被覆盖率低,生态系统稳定性差、对干扰的敏感度高、抗干扰能力弱、生态系统脆弱等特点。由于人类在喀斯特生态系统不合理的社会经济活动,如过度放牧、陡坡开垦和农作物种植等,造成土壤严重侵蚀,基岩大面积出露,土地不断石漠化,生产力严重下降,严重影响了社会经济的发展和群众的生产生活(王世杰,2002;王德炉等,2004)。研究表明,世界最大的喀斯特分布是以贵州为中心,包括云南、四川、湖南、广西四省(自治区)的西南地区,而贵州是世界喀斯特地貌发育最典型的区域,喀斯特地貌面积占全省总面积的70%以上(吴绍贵,2009)。陈起伟等(2007)利用贵州省遥感影像,在地理信息系统(GIS)平台上分析了贵州喀斯特石漠化现状,结果表明,全省喀斯特面积为11.32万km²,现有石漠化土地面积达4.12万km²,约占全省喀斯特面积的36.3%,为西南地区石漠化最严重的省份。白晓永等(2009)的研究发现,石漠化治理速度赶不上形成速度,两者的比值为82.29%,表明石漠化呈现出不断加剧的趋势。治理石漠化目前已经成为整个西南喀斯特山区生态环境建设与可持续发展的重点和难点,并引起了国内外的广泛关注(王世杰,2002;Yuan,1997;洪业汤,2000)。

土壤水力侵蚀是我国水土流失的主要类型。在喀斯特地区,各种原因导致的土地石漠化是我国最严重的生态环境问题之一。尽管石漠化形成原因复杂,但目前认为,土壤水力侵蚀是造成土地石漠化的最主要原因(王世杰,2002)。因为存在岩溶强烈的地质条件,决定了一些地区很可能要石漠化,但在森林植被保存完好的条件下,土层被很好地保护,没有发生石漠化,说明植被对调控土壤水力侵蚀和遏制石漠化进程发挥着不可忽视的作用(Yuan,1997;洪业汤,2000)。阔叶林是喀斯特地区稳定的森林植物群落,对控制山区土壤水力侵蚀有着非常重要的意义。

在各种类型森林中,凋落层是森林生态系统垂直结构上的3个主要功能层之一(申卫军等,2001)。它在截留降水、防止土壤溅蚀、阻延地表径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲效能等方面都具有非常重要的意义。凋落层的厚度决定了土壤侵蚀环境的好坏,影响着生态系统土壤侵蚀强度。在喀斯特森林,凋落层还为森林提供了主要的营养来源,使喀斯特森林得以持续。森林凋落层主要包括凋落的叶、枝、花果、动物残体和代谢产物等,其中叶所占的比例最大(申卫军等,2001;曾昭霞等,2010;赵勇等,2009;潘辉等,2010;于明坚等,1996;钱正敏等,2009)。因此,叶的凋落量对凋落层的维持发挥着重要作用。叶凋落量越大、分解率越小,越有利于维持凋落层厚度,增强土壤侵蚀控制能力,反之,凋落层越薄,越不利于土壤侵蚀控制。不同生活型的树种

叶子的凋落速率不同,落叶树种冠层叶一年全部凋落,而常绿树种的叶一年中只凋落其中一部分,不少树种需要3年以上才能全部凋落。同时,由于叶片特征以及凋落叶中初始化学成分的差异,凋落叶分解率也不同。所以,凋落层厚度的维持很大程度上取决于叶凋落速率和分解率的动态平衡(韩冰等,1994;李振新等,2004)。因此,不同树种叶凋落速率高低和分解速率的快慢,直接影响着凋落层的保持,调控着土壤水力侵蚀。通过喀斯特地区阔叶林不同树种叶凋落速率以及凋落叶分解速率的研究,可以评价不同树种对凋落层维持的相对贡献,其意义显而易见。

本研究通过实测不同单株树种冠层叶生物量、枝条叶子不同年份存留数、冠幅下凋落叶的残留量,建立常绿树种叶生命表,了解各树种冠层叶的凋落特征,计算出各树种叶子的凋落速率,测定凋落叶相关化学指标,利用分解率模型计算出分解率,分析凋落叶残留量与冠层叶生物量、凋落速率、分解速率之间的关系,了解叶凋落-分解对凋落层维持的影响;根据冠层叶生物量和凋落速率计算出各树种的年凋落量,然后再根据凋落叶残留量计算出各树种叶的残留率,分析凋落叶残留率与其化学指标的关系,了解凋落叶初始成分对残留率的影响,同时实测各树种所在位置的海拔、坡向,分析凋落叶残留率与海拔、坡向的关系;建立凋落叶年残留量与影响因子之间的关系,量化各树种在喀斯特凋落层维持中的贡献,为喀斯特地区筛选水土保持树种提供理论依据。

1.2 森林凋落物研究现状

森林凋落物也可称为森林枯落物或有机碎屑,是指在森林生态系统内,由地上植物组分产生并归还地表,作为分解者的物质和能量来源,借以维持生态系统功能的所有有机质的总称(王凤友,1989)。它包括林内乔木和灌木的枯叶、枯枝、落皮及繁殖器官,野生动物残骸及代谢产物,以及林下枯死的草本植物及枯死植物的根(林波等,2004)。目前对森林凋落物的研究主要集中于凋落量与分解速率,最早可追溯到德国学者 Ebermayer (1876) 对森林凋落物的生产和化学组成所做的经典研究。而后国外许多学者大量报道世界范围内森林凋落物的分解及养分释放等方面的研究成果(Berg et al., 1993; Edmonds and Thomas, 1995)。我国自20世纪60年代开展了森林凋落物研究,80年代有了较大发展,主要集中在森林凋落物组分、凋落量、凋落动态、凋落物分解及养分归还以及和水文生态功能的关系研究上,而且研究多为森林群体,对个体树种的凋落速率、凋落量、分解率报道较少。

1.2.1 森林凋落量及影响因素

森林凋落量是指单位面积森林所有凋落物的总量,常常用年凋落量和月凋落量两个指标表示(吴承祯等,2000)。自20世纪60年代以来,Dray 和 Gorham (1964)、王凤友(1989)等中外学者对世界范围内森林凋落量的研究结果作了综述性报道。他们指出,就不同气候区而言,森林凋落量具有一定的变化幅度,但平均说来,全球森林年凋落量变化为 $1.6 \times 10^3 \sim 9.2 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$,叶年凋落量变化为 $1.4 \times 10^3 \sim 5.8 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$,其他组分(包括枝、皮、繁殖器官、叶鞘、动物残骸等)变化为 $0.6 \times 10^3 \sim 3.8 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 。森林类型不同,凋落物各组分所占的比例也不同。森林凋落物中,叶占有

最大比例,一般占凋落物总量的 49.6%~100.0%;枝占凋落物总量的 0~37%;果实占凋落物总量的 0~32%;其他组分占 10%左右。

影响凋落物量的因素包括自身因素和环境因素。姚瑞玲等(2006)对不同密度马尾松人工林凋落物的研究表明,凋落物量与林分密度相关。不同森林类型的森林凋落量不同。热带雨林年平均凋落量最大,其次按大小依次为常绿阔叶林、温带针阔混交林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林,寒温带针叶林最小(凌华等,2009)。森林凋落量还受森林发育状况的影响,森林从幼林到成熟林各阶段,凋落量不同。周毅等(2003)对池杉林研究表明,森林凋落量随树龄的增加而增加;官丽莉等(2004)、张德强等(2000)对鼎湖山常绿阔叶林凋落量 20 年动态的研究表明,森林凋落量大小总体上呈现出明显的波动性,认为这可能是森林维持稳定生产力的一种自我调节形式。田大伦和宁晓波(1995)对不同龄组马尾松林凋落量研究表明,近熟林的凋落量最高,中幼林次之,幼龄林再次之,成熟林最低。而马祥庆等(1997)的研究发现,8 年生杉木人工林的年平均凋落量为 $1.06 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$,明显低于成熟林($1.73 \times 10^3 \sim 5.30 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$)。对于环境因素对凋落量的影响,程伯容等(1987)研究工作显示,随着海拔的上升,森林凋落量逐渐减少;Dray 和 Gorham(1964)研究显示,森林凋落量也随纬度增加逐渐减少。王凤友(1989)认为,森林凋落量由纬度和海拔因子共同决定,并给出了凋落量随纬度和海拔变化的多元回归模型。

森林凋落量也受时间的变化影响,因为森林凋落量具有明显的季节变化规律。其季节动态有单峰类型,也有双峰类型或不规则类型。某一种类型的出现,主要依赖于林分组成树种的生物学和生态学特性(王凤友,1989)。钱正敏等(2009)、魏鲁明等(2009)对茂兰喀斯特森林的研究表明,常绿阔叶树种叶凋落季节动态属于双峰型,而落叶树种则属于单峰型。但必须指出,凋落量动态还受气候条件的影响。因此,同一森林类型有可能在不同地域呈现不同的动态模式。

1.2.2 凋落物的分解

凋落物的分解直接影响着凋落层的积累。凋落物分解的早期研究,多集中于测定特定群落的失重率或分解率。20 世纪 30 年代前后,凋落物分解的研究已深入到机理问题。Melin 于 1930 年发表了“北美几种森林凋落物的生物分解”一文,使用了 C/N 值来分析落叶的分解特征,C/N 值后来成为评价落叶分解的经典指标。20 世纪 40 年代研究工作认识到阔叶树凋落叶能促进针叶树凋落叶的分解。90 年代以来,凋落物分解问题被放到全球变化背景下来研究。

凋落物的分解既有物理过程,又有生物化学过程,一般在淋溶、粉碎、代谢作用的综合作用下共同完成(田大伦等,1989;郭剑芬等,2006)。许多学者发现凋落物分解过程中先后出现分解速率较快和较慢两个阶段,其原因在于分解初期,水溶性物质和易分解的碳水化合物被快速的淋失和降解(胡肄慧等,1987;许新建等,1995;邱尔发等,2005)。随着分解的继续,木质素等难分解物质不断积累(达到 45%~51%),凋落物的进一步分解受抑制,分解速率明显降低(代静玉等,2004)。

凋落叶分解主要受两大因素影响。一类因素是凋落物自身特征,包括凋落叶的物理特征和初始化学特征。物理特征通常是指凋落叶的表面特征,初始化学特征为凋落叶初

始化学物质组成和含量。大量研究表明,植物外部形态特征的差异还受化学特征的影响(Rustad and Cronan, 1988; Beare et al., 1992; 郭剑芬等, 2006)。另一类因素是环境条件,主要是指光、温、水、气、热、分解者、土壤环境等条件。Aerts (1997)的研究表明,在全球和区域尺度上,气候条件是决定凋落物分解速率的主导因素,凋落物初始化学特征只处于次要地位,而在局部范围内,凋落物初始化学特征对分解则起主要作用(郭剑芬等, 2006)。说明在一个局域点上,凋落叶的初始化学物质组成和含量对叶分解速率起主要作用,其次才是其他因素。

1.2.2.1 内在因素对凋落物分解的影响

影响凋落物分解的内在因素主要是指凋落物的初始化学物质组成和含量,又称之为“基质质量”,即主要有营养元素(氮、磷、钾)、难分解的有机成分(全碳、木质素、纤维素、单宁等物质)以及营养元素与难分解的有机成分的比值。基质质量与分解率相关,其基本原理是:凋落物分解主要是真菌与微生物的作用过程,凋落物中的C/N值或C/P值含量通常小于土壤生物,能满足其对N、P等营养元素的需求。当凋落物的养分较高时,微生物群落生长加快,分解也就加快。然而,不同的植物凋落物化学物质组成和含量不同,从而影响它们的分解速率。具体地,影响凋落物分解常见的指标有C/N值、木质素/N值、N及P的浓度等(王相娥等, 2009)。

凋落物的物质组成和含量对分解率的影响与分解阶段有关。在分解过程中,N被认为是制约凋落物分解最重要的因素之一(Berg and McClaugherty, 2003; Vitousek, 2004)。Taylor等(1989)研究发现,凋落物分解前期由N决定着凋落物分解速率,后期由木质素浓度或木质素/N值决定着凋落物分解速率。但Vitousek (2004)、Berg and McClaugherty (2003)的研究则表明,初始C/P值及P含量是凋落物分解更重要的指标。Aerts (1997)发现,几种藁草属(*Carex*)植物凋落物的分解初期(3个月内)主要受与P相关的凋落物化学指标的影响,之后分解速率又与酚类物质/N值、酚类物质/P值、木质素/N值明显相关。Berg和Matzner (1997)对温带常绿树种凋落叶分解研究时发现,凋落物的分解速率在初期与养分指标密切相关,即叶中N、P、K初始浓度越高,初期分解速率越大,而后期分解速率降低。Aerts (1997)对这一现象的解释是:①分解过程中木质素积累,且N可以和木质素及其降解产物形成难分解的复合物;②N对起降解作用的真菌群落活性及组成产生影响。

1.2.2.2 气候因素对凋落叶分解率的影响

气候因素是影响凋落物分解的非生物因素,主要体现在温度与湿度两个方面(彭少麟和刘强, 2002)。在全球区域尺度上,气候因素是影响凋落物分解的最基本的因素,不同气候带凋落物分解速率顺序为热带>亚热带>温带>寒温带,凋落物分解速率呈现明显的气候地带性,其中热带森林凋落物年均分解速率达到30%~90%,是温带森林的3倍。凋落物分解的地带性表明凋落物分解与其在不同生境中的温度、湿度变化紧密相关。在局部区域,凋落物的分解速率随着温度的升高而增加。Vitousek等(1994)在太平洋热带岛屿Mauna Loa的研究表明,随着海拔升高,气温降低,凋落物的分解速率呈指数降低。Hornsby等(1995)在不同温度下测定枯枝落叶的分解速率,发现

分解速率随温度的升高而增大。Moore 等 (1999) 认为年平均气温是分解速率最密切相关的控制因子。温度升高促进了土壤养分的矿化和可利用性, 促进了微生物活性, 从而加快了凋落物的分解 (孙志高和刘景双, 2007)。但同时, 温度变化也会影响森林群落物种组成、结构及物候变化、凋落物基质质量、土壤养分可利用性和高纬度湿地融冻层深度等, 进而直接或间接地影响凋落物的分解速率 (Chen et al., 2001)。

湿度是影响凋落物分解的另一个重要因素, 水分可以通过淋溶作用直接影响凋落物的分解速率, 降水量的变化可以通过影响凋落物的基质质量而影响其分解, 这正是热带地区持续高温和年降水量大, 其分解速率远高于其他气候带, 凋落物在一年内就可能全部分解殆尽的原因 (李雪峰等, 2007)。另外, 水分含量的多少直接影响着微生物的活性, 进而影响凋落物分解速率。Austin 和 Vitousek (2000) 对生长在不同降雨条件下的同一树种的研究表明, 随着降雨量增加, 凋落物分解速率增加。而在一些温带生态系统中, 高的降雨量可使地表的凋落物处于嫌气条件下, 这反而使凋落物分解速率降低 (Vitousek et al., 1994)。此外, 枯枝落叶层的干湿交替也对凋落物的分解产生影响。Mondini 等 (2002) 发现, 凋落层干湿交替减少了微生物的数量, 在一定程度上降低了分解速率。同时, 干湿交替能促进细菌对分解底物 (如半纤维) 的分解, 而不利真菌对难分解复合物 (如木质素) 的分解。目前在森林中对温度、湿度单一因素的研究较少, 原因在于自然状态下单一条件难于控制, 凋落物的分解不可避免地受其他因素的影响。

1.2.2.3 土壤生物对凋落物分解的作用

土壤生物不仅包括细菌、真菌等微生物, 还包括蚯蚓、白蚁、昆虫幼虫等土壤动物, 它们全都参与凋落物分解全过程, 并且在分解中发挥着重要作用。其中, 微生物直接参与凋落物大部分的分解, 土壤动物对凋落物分解则有直接与间接的影响 (Ayres et al., 2006)。土壤动物 (蚯蚓、节肢动物) 可通过粉碎凋落物增加微生物对凋落物分解的作用面积 (Bradford et al., 2002), 加快凋落物的分解, 同时其本身排泄的粪便养分含量丰富, 降低了凋落物的 C/N 值, 间接使凋落物容易分解, 提高了凋落物的分解速率。此外, 土壤动物的排泄物还增加了蛋白质、生长物质, 促进了微生物的生长, 从而使微生物更有利于分解凋落物 (杨曾奖等, 2007)。

目前对土壤生物与凋落物的研究主要在土壤动物、土壤微生物两个方面。例如, 张雪萍等 (2001) 研究了马陆对山地森林凋落物分解的贡献, 发现马陆对凋落物的分解量约占该地区年平均凋落量的 0.21%。田兴军和立石贵浩 (2002) 在研究土壤动物对针叶林凋落叶分解的影响中发现, 动物的取食会加速针叶的分解。Vossbrinck 等 (1979) 利用不同孔径的凋落物分解袋和杀菌处理来区分微生物、土壤动物和非生物因素对凋落物分解的贡献。发现无微生物作用的凋落物分解速率低于有微生物作用的凋落物分解速率。另外有研究显示, 土壤生物对凋落物的粉碎分解有的具有专一性。例如, 阔叶混交林中硬质叶子的分解较慢, 不仅微生物很难将其分解, 而且很多土壤动物也较难摄食, 而林中白蚁则对凋落叶有蛀蚀作用, 白蚁种群对该凋落物的快速分解显得非常重要 (廖崇惠和陈茂乾, 1990)。土壤动物与微生物的活动持续时间和强度受气候因素的影响, 在北回归线以北地区, 土壤动物活动受温度限制, 而在热带干旱地区则受湿度限制。微

生物活动也受温度和湿度的共同影响，温度过高或过低都会限制微生物活动，湿度的变化则影响微生物的丰富度和活性。

1.2.3 凋落层的水土保持效益

凋落层作为森林生态系统垂直结构上的3个主要功能层之一，由于其覆盖地面，降雨雨滴不直接接触土壤，增加了土壤的抗冲能力，减少了土壤的抗溅蚀性。汪有科等（1993）研究表明，林地的抗冲能力均高于农地，且是农地的2.5~6.5倍。韩冰等（1994）的研究表明，山杨林、油松林凋落层为1cm时，分别可减少溅蚀量97.5%、79.6%，大于2cm时基本可消除溅蚀的产生。韩冰等（1994）分析了天然降雨条件下中龄和28年生油松林的溅蚀实验资料，发现随着凋落层厚度的增加，溅蚀量剧减。同时，地表凋落层具有很强的持水能力，可以有效地吸持降落到地表的降水，延缓地表径流的产生，增加入渗时间。马雪华（1987）研究表明，凋落层最大持水量为自身干重的2~4倍；刘建立等（2009）监测到宁南县山区华北落叶松的凋落物饱和持水量能达到自身重量的4倍，马占相思林凋落物最大持水量则为凋落物重的2.54倍，可达28.26t/hm²，相当于2.8mm的降水。汪有科等（1993）的研究显示，当有0.5cm凋落层时，可降低径流速度80%~90%。吴长文和王礼先（1993）运用人工模拟降雨试验表明，搂去凋落物的林地，将使径流系数增大75%，最大径流量增大58%，径流含沙量增大6.3倍，土壤侵蚀量增加12.95倍。此外，腐烂的凋落叶增加了土壤有机质含量，促使土壤生物和微生物种类及数量增加，有利于促进土壤团粒结构的形成，进而影响到土壤透水性，使地表径流减少（刘向东等，1991）。半分解和未分解的凋落物则直接增加地表的粗糙度，由此影响地表径流流速，直接减轻了径流对地表土壤的冲刷。张洪江等（1994）通过对山西地区人工林、次生林、灌木林、农田以及裸露地上凋落物的粗糙率系数进行研究后得出，凋落物的积累数量与粗糙系数之间存在着明显的正相关关系；吴钦孝和赵鸿雁（2000）研究发现，在黄土高原常见坡度25°条件下，有1cm厚的凋落物覆盖，径流速度就可以降低到相当于无覆盖坡面的1/15~1/10，从而有利于降水的快速入渗。刘向东等（1991）在研究凋落叶阻滞径流效应时发现，径流流出时间随枯枝落叶层厚度的增加而延长，随坡度和径流深度的增加而缩短。

1.3 本研究关注的科学问题

以上综述表明，过去的研究对不同森林凋落物量、凋落物分解因素、凋落动态以及凋落物对水力侵蚀调控等的研究较充分。目前这个领域需要关注的问题是：①对凋落物量的研究多为森林群落水平上对不同森林凋落物产量的观测，大量地反映森林中具体物种的凋落量的研究很少，如果要对森林凋落量作全面了解，需要掌握森林中每种树木的凋落量。②凋落量的测定多采用直接收集法，即凋落物收集器法。此法工作量大、需时较长，且在收集时凋落物容易分解和遭到雨水的淋洗失重、受人类活动的干扰等造成结果不准。有研究表明，一个林分类型设收集器不能少于10个，且每个收集器的面积不能小于0.2m²（王凤友，1989）。而且随着收集面积的增加，区分凋落物组分的工作量