



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

紫色土区坡地植被 水土保持效应及机理

郑江坤 等 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

紫色土区坡地植被 水土保持效应及机理

郑江坤 等 著

科学出版社

内 容 简 介

随着一系列生态工程的实施,紫色土区的水土流失得到有效遏制,定量评价紫色土区生态工程的水土保持作用尤为重要。本书基于长时间的野外定位观测和室内分析,以酸性紫色土、中性紫色土、石灰性紫色土为研究亚类,分别探讨了典型牧草、植物篱、柏木低效林改造、苦竹林、巨桉和柳杉栽植、植被建设和滑坡后柏木林对紫色土坡地土壤水分物理性质、化学性质、微生物数量特征及其空间分布的影响,并在此基础上研究植被对降水的垂直分配过程及水化学循环机制,进而分析坡地植被下产流产沙规律,并探讨其携带养分的输移特征。

本书可供水土保持学、水文水资源学、自然地理学、环境科学等专业的科研人员,高等院校师生,以及从事生态工程、水土保持工程和环境工程的技术管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

紫色土区坡地植被水土保持效应及机理/郑江坤等著. —北京:科学出版社, 2017.6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-053227-5

I. ①紫… II. ①郑… III. ①紫色土-坡地-植被-水土保持-研究 IV. ①S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 126369 号

责任编辑:彭胜潮 丁传标 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张欣秀 / 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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 305 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

本书作者

郑江坤 胡红玲 涂利华

秦 伟 李贤伟 胡庭兴

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

序

水是生命之源，土是生存之本。随着人口增长和经济快速发展，水土流失以及引发的水污染问题得到广泛关注。紫色土土层浅薄、抗蚀性差，水土流失严重程度仅次于黄土。近年来，国家实施了天然林资源保护工程、长江流域重点防护林体系建设工程、退耕还林工程等林业生态工程；作为紫色土集中分布的四川省，其林草植被恢复效果显著，森林覆盖率已由 1978 年的 13% 上升到 2015 年的 36%，水土流失也得到了有效遏制。

该书既有植被水土保持作用的理论性探讨，又介绍了坡地水土流失监测技术和方法，最为突出的是，该书结合多年的野外观测，应用大量翔实数据定量评价了植被的水土保持效应，并对机理进行了探讨。郑江坤博士一直从事生态水文和水土保持方面研究，其勤奋刻苦、一丝不苟的科研态度给我留下了深刻印象，到四川工作后，他在紫色土水土保持领域做了大量研究并取得了显著的成果。

该书以坡地水土保持为主线，以本土数据资料和作者的研究成果为基础，结合国内外森林水文学的研究前沿，较系统地阐述了紫色土区植被建设的水土保持效应，并就该区生态水文领域进行了积极的探索，可为我国紫色土区生态文明建设提供重要的理论指导和数据支撑。

该书的出版可为生态学、水文学、地理学、环境学等学科的教学科研工作提供有益参考，也可为水土保持、林业等生态环境建设者提供科学依据。是以为序。

余新晓

2016 年 12 月于北京林业大学

前 言

水土保持是中国长期坚持的一项基本国策，是生态文明建设的重要基础。林草植被作为控制水土流失的主要措施，在保护水土资源中发挥着重要作用。

紫色土由侏罗纪、白垩纪时代形成的紫色或紫红色砂岩、页岩经过频繁的风化作用和侵蚀作用演变而来，富含钙质（碳酸钙）和磷、钾等营养元素（何毓蓉等，2003）。主要分布于中国亚热带地区，在南方诸省盆地中有零星分布，以四川盆地分布最为集中，按照土壤 pH 和碳酸钙含量，可划分为酸性紫色土（ $\text{pH} < 6.5$ ）、中性紫色土（pH 为 6.5~7.5）和石灰性紫色土（ $\text{pH} > 7.5$ ）3 个亚类。

针对紫色土区坡地水土流失问题，国家和地方开展了诸如天然林保护工程、退耕还林（还草）工程、长江中上游防护林体系建设工程等多项措施，并取得了显著成效。本书作者结合相关工程的实施，开展了一批重要的科研项目，在植被的水土保持效应方面积累了丰富的数据。近年来在水利部公益性行业科研专项经费项目（201501045）“西南紫色土区水土保持生态效应监测与评价技术研究”专题、国家林业局公益性行业科研专项经费项目（201104109）、国家自然科学基金项目（41601028）、中国博士后科学基金面上项目（2012M511938）和四川省高校“水土保持与荒漠化防治重点实验室”建设项目等资助下，取得了部分成果。本书紧紧围绕紫色土区的水土流失问题，基于国内外植被措施的水土保持机理论述和评价上，针对紫色土 3 个亚类，通过长期野外试验和定位监测，分别阐述了牧草、植物篱、苦竹林、柏木低效林改造、桉木和马尾松林、防护林建设，以及滑坡后的柏木林对降水的垂直分配、地表径流和亚表层径流形成、坡面侵蚀产沙规律、土壤理化性质空间分异等方面的影响。通过大量实测数据，应用生态水文学、森林土壤学、土壤侵蚀学、地统计学等学科理论和技术方法，揭示了林草植被保育土壤，涵养水源的功能和机理，为进一步促进植被在紫色土水土流失治理中的作用和实现森林生态效益核算提供了科学依据。

全书共分九章，第一章从林草植被对土壤理化性质、降水的垂直分配规律、坡地径流形成机制、土壤侵蚀机理、生物地球化学循环等方面阐述了国内外的研究进展，并对相关模型进行了介绍；第二章重点介绍了坡地水土流失影响因子的监测技术与方法；第三章探讨了 4 种典型牧草的水土保持作用；第四章详细阐述植物篱措施对径流小区土壤理化性质的影响，并探讨了植物篱措施的减流减沙特

征;第五章探讨了苦竹林森林生态系统对降水的垂直分配过程及水化学循环机制;第六章分析了柏木低效林改造初期土壤物理性质、化学性质和微生物性质,继而分析了不同林分改造模式的水土保持作用;第七章酸性紫色土区桉木和马尾松林种植初期的水土保持效应;第八章从坡面和小集水区尺度上分析了植被建设的水土保持效应;第九章探讨了滑坡后表层土壤颗粒组成、土壤团聚体和土壤养分的相关性及其空间变异特征。郑江坤主要撰写第一章、第二章、第四章、第六章、第八章和第九章,并完成全书统稿;秦伟参与了专著的顶层设计及遂宁水土保持试验站数据协调工作,并参与撰写第一章、第二章、第四章和第八章;李贤伟参与撰写第六章;胡红玲、涂利华、胡庭兴共同撰写第三章、第五章和第七章。另外,郎登潇、王文武、陈冠陶、黄鑫、马星、李静苑、麦积山、廖峰、李顺、陈旭立、王勇、赵阳参与书稿内容撰写、图表制作和版式编排工作;在此对他们付出的劳动表示诚挚的感谢。

本书得到了中国博士后科学基金资助出版,在此表示衷心感谢!

限于作者的知识和能力,书中必有不妥之处,敬请读者批评指正。

郑江坤

2017年1月于成都温江

目 录

《博士后文库》序言

序

前言

第一章 植被的水土保持作用	1
第一节 土壤理化性质研究进展	1
一、土壤颗粒组成及其分形维数	1
二、土壤团聚体	2
三、土壤养分分析与评价	4
四、土壤的空间变异特征	5
第二节 植被对土壤理化性质的影响	6
一、植物篱措施对土壤理化性质的影响	6
二、滑坡后森林土壤理化性质的变化特征	7
第三节 植被对降水垂直分配的影响	8
一、森林蒸散量确定	8
二、林冠层对降水的截留和传输	11
三、枯枝落叶层和土壤层对水分的吸持和渗透	20
第四节 植被对坡地径流过程的影响	26
第五节 植被对土壤侵蚀过程的影响	28
一、土壤侵蚀及其影响因素	28
二、林草措施对土壤侵蚀的作用	34
第六节 植被对生物地球化学循环的影响	38
一、林外降水与林内降水	39
二、凋落物渗透水	40
三、地表径流	41
四、土壤渗透水	42
第二章 坡地水土流失监测技术与方法	43
第一节 气象因子观测	43
一、光照强度的观测	43
二、气温的观测	43

三、地表温度的观测	44
四、降水的观测	44
第二节 现代地形测量	45
一、光电测量技术	45
二、遥感监测技术	46
第三节 植被调查及表征指标监测	47
一、植被调查及生物量估算	47
二、林冠层观测	48
三、地被层观测	49
第四节 土壤层观测	50
一、土壤样品采集	50
二、土壤理化性质测定	51
三、土壤水力指标测定	53
第五节 径流输沙过程观测	55
一、径流过程观测	55
二、土壤侵蚀观测	58
三、同位素示踪技术	59
第三章 酸性紫色土区典型牧草的水土保持效应	62
第一节 试验区概况	62
第二节 样地设置及试验方法	62
一、试验材料	62
二、径流小区设置	62
三、试验方法	63
第三节 坡地地表径流与产沙变化	64
一、全年地表径流及产沙量比较	64
二、次降水下产流产沙比较	65
第四节 次降水下水土流失变化过程	65
一、次降水中不同时段径流泥沙变化	66
二、次降水不同时段径流中养分含量变化	67
第五节 结论	68
第四章 石灰性紫色土区植物篱的水土保持效应	69
第一节 试验区概况	69
第二节 样地设置与研究方法	69
一、样地选择及土样采集	69
二、指标测试	69

三、数据处理	70
第三节 植物篱对紫色土坡耕地土壤物理性质的影响	71
一、植物篱对土壤容重及孔隙度的影响	71
二、植物篱对土壤持水量的影响	74
三、小结	76
第四节 植物篱措施对紫色土坡耕地土壤养分分布的影响	76
一、植物篱定植前土壤养分特征	77
二、植物篱定植 3 年后土壤养分特征	77
三、植物篱定植 3 年后土壤养分的变化量	78
四、小结	80
第五节 紫色土坡耕地植物篱两侧表层土壤理化性质变化	80
一、植物篱两侧土壤颗粒组成及团聚体的变化特征	80
二、植物篱两侧土壤孔隙度的变化特征	82
三、植物篱两侧土壤养分的变化特征	84
四、小结	84
第六节 植物篱对紫色土坡耕地土壤抗蚀性的影响	86
一、植物篱坡耕地的抗蚀性指标分析	86
二、植物篱对土壤抗蚀性的影响	87
三、小结	89
第七节 植物篱对紫色土坡耕地产流产沙的影响	90
一、不同定植年限下植物篱的减流减沙效应	90
二、不同雨强下植物篱的减流减沙效应	92
三、不同雨型下植物篱的减流减沙效应	93
第八节 结论	95
第五章 酸性紫色土区坡地苦竹林降水再分配过程与水化学特征	96
第一节 试验区概况	96
第二节 样地布设及试验方法	96
一、样地布设	96
二、样品采集	98
三、样品保存及分析	98
四、数据处理	98
第三节 华西雨屏区苦竹林生态系统降水再分配特征	99
一、林冠截留及穿透水、树干茎流特征	99
二、凋落物吸持及下渗特征	100
三、土壤吸存及输出特征	100

四、森林生态系统降水再分配特征	101
五、小结	103
第四节 华西雨屏区苦竹林生态系统水化学特征	103
一、pH 变化特征	103
二、碳组分浓度随水流变化特征	104
三、氮组分浓度随水流变化特征	107
四、硫酸根离子变化特征	109
五、钾钙镁离子变化特征	110
六、小结	112
第五节 结论	117
第六章 石灰性紫色土区坡地林分改造的水土保持效应	118
第一节 石灰性紫色土区典型林分枯落物持水特征	118
一、研究区概况	118
二、试验材料与方法	118
三、石灰性紫色土区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性	120
四、小结	126
第二节 柏木低效林改造样地设置与研究方法	126
一、研究区概况	126
二、研究方法	127
第三节 柏木低效林改造初期土壤物理性质变化特征	128
一、不同改造模式土壤物理性质分析	128
二、低效林改造前后土壤物理性质的变化	130
三、小结	132
第四节 柏木低效林改造初期土壤养分变化特征	132
一、不同改造模式土壤养分分析	132
二、低效林改造前后土壤养分的变化	134
三、小结	136
第五节 柏木低效林改造初期土壤酶及微生物变化特征	136
第六节 不同柏木低效林改造模式对逐月水土流失的影响	139
一、不同改造模式对逐月林地产流产沙的影响	139
二、不同改造模式对逐月林地养分流失总量的影响	142
三、不同改造模式下径流与泥沙携带养分浓度比较	143
四、不同改造模式下逐月土壤养分流失动态过程	145
五、小结	147

第七节 不同林分改造模式对次降雨水土流失的影响	148
一、各林分改造模式次降雨前土壤理化性质	149
二、不同改造模式下次降水对土壤侵蚀过程的影响	150
三、小结	152
第八节 结论	153
第七章 酸性紫色土区不同植被类型的水土保持效应	154
第一节 样地设置与实验设计	154
一、实验材料	154
二、实验设计	154
第二节 不同植被覆盖模式的坡地产流产沙特征	156
一、降水特征与水土流失	156
二、林草植被与水土流失	156
三、小结	157
第三节 不同植被覆盖模式的地表径流可溶性养分流失特征	158
一、地表径流可溶性 N 流失特征	158
二、地表径流可溶性磷、钾离子流失量	160
三、地表径流可溶性 C 流失量	162
四、小结	163
第四节 不同植被覆盖模式的土壤理化性质变化	164
一、不同植被覆盖模式土壤物理性质	164
二、不同植被覆盖模式土壤化学性质	167
三、小结	174
第五节 结论	176
第八章 石灰性紫色土区植被建设的水土保持效应	178
第一节 研究区概况	178
第二节 研究方法	179
第三节 植被调整对紫色土区坡面产流产沙的影响	182
一、1983~2001 年次降水特征	182
二、植被调整后产流产沙年际变化特征	183
三、植被调整前后次降水与产流产沙特征的相关分析	184
四、次降水条件下不同土地利用方式坡面侵蚀综合统计分析	186
五、小结	187
第四节 石灰性紫色土集水区植被建设的水土保持效应	188
一、径流泥沙演变趋势分析	188

二、植被建设的水文效应	188
三、植被建设的减流减沙作用	189
四、小结	191
第五节 结论	192
第九章 中性紫色土区林地表层土壤理化性质对滑坡的响应特征	193
第一节 研究区概况	193
第二节 研究方法	193
第三节 滑坡体表层土壤团聚体、颗粒组成和养分含量特征	195
一、风干性土壤团聚体组成	195
二、水稳性团聚体组成	195
三、土壤团聚体的稳定性特征	196
四、土壤颗粒组成及其与土壤颗粒质量分形维数的关系	197
五、土壤养分统计特征	199
六、滑坡对土壤养分含量的影响	199
第四节 滑坡体表层土壤团聚体、颗粒组成和养分的空间结构特征	201
一、土壤团聚体稳定性参数的空间结构特征	201
二、土壤颗粒组成空间结构特征	202
三、土壤养分空间结构特征	202
第五节 滑坡体表层土壤团聚体、颗粒组成和养分的空间分布格局	203
一、土壤团聚体稳定性参数空间分布	203
二、土壤颗粒组成空间分布	205
三、土壤养分空间分布	206
四、小结	208
第六节 土壤团聚体和颗粒组成与土壤养分的相关性分析	211
一、风干性土壤团聚体与土壤养分的相关性	211
二、土壤水稳性团聚体与土壤养分的相关性	212
三、土壤团聚体稳定性参数与土壤养分的相关性	212
四、土壤颗粒组成与土壤养分的相关性	213
五、小结	214
第七节 结论与建议	215
一、结论	215
二、建议	216
参考文献	217
编后记	247

第一章 植被的水土保持作用

第一节 土壤理化性质研究进展

一、土壤颗粒组成及其分形维数

土壤是由形状大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质,土壤颗粒组成影响土壤的疏水性和空气循环、结构性状和养分含量,决定其通气透水、调节水肥和温度等功能,进而影响土壤的理化性质和生物学过程(王德等,2007;宋孝玉等,2009;吕圣桥等,2011)。土壤颗粒组成和土壤侵蚀强度密切相关,土壤的粒径分布在某种程度上决定了土壤的结构和性质,常作为分析和预测土壤性质的重要指标(Tyler and Wheatcraft, 1992;周先容和陈劲松,2006)。土壤颗粒组成的异化现象在一定程度上表征土壤质量退化的程度(文海燕等,2006;彭怡等,2010),土壤有机质、氮、磷、钾等的含量都与土壤颗粒组成密切相关(王洪杰等,2003)。通过土壤颗粒组成的研究,能够更充分地认识土壤演替过程和更科学地提出土壤改良方法、土壤耕作方式和植被恢复模式。

分形理论起始于20世纪70年代,美籍数学家曼德布罗特(Mandelbrot)在1973年首先提出分形概念,并于1975年创立了分形几何学,1982年*The Fractal Geometry of Nature*出版标志着分形理论的初步形成(Mandelbrot, 1982)。后又在此基础上形成了分形性质及其分形理论科学,逐渐盛行各研究领域。近年来分形理论的应用发展远远超过了理论发展,各种分形维数计算方法创新和优化,使得分形维数更加科学,计算更加简单,使用范围更加广泛。

1980年年初,Arya等(1981)将分形理论应用于土壤科学之中,并提出了描述土壤孔隙结构特征的经验公式。土壤的粒径分布关系是土壤最基本的物理属性,常被用来描述土壤质地和结构特征、预测和模拟土壤水力特性。Tyler和Wheatcraft(1992)利用土壤颗粒的粒径分布数据得出了一组粒径与孔隙度分形维数之间的关系,并用土壤颗粒粒径的质量分布来表征分形特征,从而大幅度地简化了参数的测定,增强了模型的实用性。其土壤粒径分形维数模型为

$$\left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{W_i}{W_0} \quad (1-1)$$

式中, R_i 、 $R_{\max}$ 为第*i*粒级和最大粒级的平均直径; W_i 、 W_0 为*i*粒级土粒的质

量和各粒级质量总和； D 的范围应为 $0 < D < 3$ ； D 越大表明土壤质地越细； $D=0$ 时土壤由同种尺寸的颗粒组成。

杨培岭和罗远培（1993）改进了国外的分形维数计算方法，将粒径分布与对应的质量分布相联系，提出用粒径的质量分布表征土壤分形模型公式为

$$\lg \left[\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_T} \right] = (3 - D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right) \quad (1-2)$$

式中， $M(\delta < \bar{d}_i)$ 为土粒直径小于第 i 个粒级土粒的平均直径的累积质量； M_T 为土壤样品总质量； $\bar{d}_i$ 为两相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径； $d_{\max}$ 为最大粒级土粒平均直径； D 为土壤颗粒组成的分形维数。刘梦云等（2007）应用此模型研究了宁南山区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征；庄淑莺（2007）对耕层土壤颗粒组成分形特征也进行了研究。目前，有关土壤颗粒组成分形研究的方法可分为 3 类，分别为质量分形、体积分形和数量分布表征的分形。李强等（2015）采用土壤颗粒质量分形研究了植烟土壤分形特征；慈恩等（2009）利用土壤颗粒体积分形对不同耕作年限水稻土土壤进行了分形特征研究；张季如等（2004）利用数量分布表征的分形方法得出了 6 种土样的土壤分形维数。

二、土壤团聚体

土壤团聚体指在有机或无机胶体等各种物质的黏合作用下由个体土粒形成的大小不同、性质各异的土壤结构的基本单位（崔晓阳等，2004），土壤团聚体作为土壤物质和能量的转化及代谢场所，其含量和分布状况必然影响土壤质量和肥力状况（林大仪，2004）。通常情况下我们所说的土壤团聚体可分为两种：第一种是非水稳定性团聚体，该类团聚体浸泡在水里则不能继续保持其原来的结构而快速分散；第二种是水稳定性团聚体，由有机质、钙、铁等阳离子胶结形成，在水力作用下不易分散破碎且能保持其原有结构（林大仪，2004）。

（一）土壤团聚体的形成及破坏机制

许多小粒径的土壤微团聚体通过各种胶结物的胶结作用而逐渐形成土壤团聚体，其中粒径大于 0.25mm 的大团聚体主要是微团聚体颗粒通过有机质和菌丝胶结而成，与有机胶结物质和土壤黏粒的相互作用有关，粒径小于 0.25mm 的微团聚体主要是由无机胶体通过阳离子桥胶结而成（梁斐斐，2013）。Edwards 和 Brenner（1967）表示多糖是引起土壤团聚作用的主要因素，并提出无机有机复合体为基础的土壤团聚体形成模式。Skidmore 和 Powers（1982）研究发现土壤团聚体是由 $< 0.25\text{mm}$ 的微团聚体胶结形成，而且各粒级团聚体的胶结剂和稳定