



红壤坡地 侵蚀产沙及养分流失 模拟研究

张丽萍 著



科学出版社

红壤坡地侵蚀产沙及养分 流失模拟研究

张丽萍 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了红壤坡地侵蚀产沙及养分流失过程试验及规律性结论。书中基于农业土地利用的主要类型及影响侵蚀产沙和养分流失的主要影响因子,从总体试验设计到具体试验安排,从降雨的再分配到坡面径流的产沙,从泥沙分离到泥沙输移,从养分流失到水体富营养化影响,进行了逐步的机理分析和宏观规律的讨论。遵循试验研究为生产建设服务的宗旨,探讨了室内模型试验数据的生产实际应用的转化问题,理清了转化系数的推求思路。最后,在试验数据和研究结论的基础上,总结了红壤坡地水力侵蚀的多方位调控和流域系统宏观的水土流失防护体系的优化设计方法。

本书可供从事土壤侵蚀、泥沙输移、水土保持及生态环境等有关专业领域的科研人员及高等院校相关专业的师生阅读参考,可作为研究生课程的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

红壤坡地侵蚀产沙及养分流失模拟研究/张丽萍著. —北京:科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061287-8

I. ①红… II. ①张… III. ①红壤-坡地-侵蚀产沙-养分流失-模拟-研究 IV. ①P512.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 097574 号

责任编辑:朱海燕 石 璐/责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东/封面设计:图阅社

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:330 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水土保持是我国生态文明建设的重要组成部分，侵蚀产沙过程的控制是江河湖泊治理的根本，坡地养分流失的调控是减少水体富营养化的前提。水土保持措施布设的支撑依据就是水土流失的监测数据，严密而精度高的试验数据是水土保持措施发挥作用的基本保证。

我国红壤主要分布在长江以南广阔的低山丘陵区，总面积约占全国总土地面积的1/5，主要以发育在岩石风化所形成的残积母质层和红色风化壳上的土壤为主。红壤形成的母质条件，决定了其独特的土壤特性，土层较薄，富铝化程度较高。由于红壤地处热带和亚热带，年降水量丰富，水力侵蚀是其主要侵蚀方式。同时，我国南方红壤区，水热条件优越，是我国主要的粮食和经济作物生产区，在我国的农业和国民经济建设中占据十分重要的地位。但是，由于人类长期对土地资源的过度和不合理开发利用，整个红壤区的山丘坡地生态环境遭到严重破坏，土壤侵蚀不断加剧，土壤养分流失造成的贫瘠化现象十分严重，诱发的水体面源污染程度加重。因此，研究南方红壤区山丘坡地的侵蚀产沙和养分流失过程，揭示不同土地利用方式下的水土和养分流失机理，提出控制水土流失的优化组合措施，能为红壤山丘地区坡地水土和养分流失的控制提供数据支撑，为红壤山丘地区生态系统的维护、资源的可持续利用和保护提供科学的依据。

针对红壤坡地特殊的环境条件、开发利用特征及存在的水土流失问题，本专著所涉及的研究从土地利用方式着手，采用野外原位人工模拟降雨、径流小区天然降雨观测和室内模型模拟降雨的方法，开展了系列侵蚀产沙和养分流失的单因素和多因素组合试验，研究了不同侵蚀环境条件下的侵蚀产流产沙及养分流失规律，从水力学的角度讨论了产流产沙的力学机制。

本书以浙江省红壤坡地为例，本着遵循自然规律这一科学研究的根基，从红壤坡地土地利用方式转换过程中对侵蚀产沙和养分流失的影响开始思考，分析了不同土地利用情况下水土流失规律的不同机制，重点揭示了典型经济林地和坡面菜地特殊管理背景下的产沙和养分流失特征。科学的研究方法是获得有效试验数据的基础，为了能够探讨不同环境因素对侵蚀产沙和养分流失的影响和作用机制，获得较为精确的试验数据，避免天然降雨可控性的限制，在室内修建了变坡度、变坡长、变植被覆盖度及植被覆盖结构的多种实体径流槽模型，开展了系列单因素和多因素的组合试验。由于林相结构复杂，野外原位人工模拟降雨试验受到限制，本专著关于林相结构部分的试验是在室内径流槽上人工布设和模拟林相结构及覆盖度，采用人工模拟降雨的方式进行，取得了不同林相结构情况下的侵蚀产流产沙数据。本着科学研究为经济建设、生产服务及生态环境优化的宗旨，本专著探讨了室内模拟试验与实地原位侵蚀产沙与养分流失之间的关系，构建了产流产沙的转换模型，推导出转换系数，使得试验数据的实用性更加切合实际。针对性地提出红壤坡地不同土地利用方式下的水土保持措施，从整体观出发优化了相应水土

保持措施的组合布设,系统构建了水源地水土保持防护体系框架。

本专著的相关研究和出版得到了水体污染控制与治理科技重大专项“苕溪流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范(2014ZX07101-012)”、国家自然科学基金项目“风化花岗岩侵蚀坡地表层流水流动态及携氮磷流失特征研究(41471221)”、“浙江省低丘缓坡水土流失防治对策研究 RI0701”、江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放研究基金项目“红壤坡地不同降雨情况下壤中流水流动态及携氮磷流失研究(JXSB201502)”、永康市水土保持监督管理站“永康市杨溪水源区方山柿基地水土流失面源污染监测项目(H20122709)”等的资金资助。

本专著的系列研究成果是在一个较长时间内完成的,是作者多年来在指导研究生过程中重点成果的集结。作者的历届博士研究生钱婧、付兴涛、吴希媛、王小云、邓龙洲、孙天宇,以及硕士研究生刘俏、张芳芳、王文艳、连琳琳、邬燕虹、范晓娟、费凯等,在试验、测试及专著的编写过程中做出了巨大贡献,对他们表示衷心感谢。

在本专著所涉及的系列研究的试验过程中,得到了浙江省水利厅农村水利水电与水土保持处、浙江省水土保持监测中心、浙江省水利河口研究院、浙江省安吉县水土保持监督管理站、浙江省永康市水土保持监督管理站、浙江省兰溪市水土保持监督管理站、浙江大学农业科学试验站(长兴基地)等单位 and 部门工作人员的大力支持,在此对他们表示诚挚的感谢。

坡面侵蚀产沙及养分流失过程及机理研究所涵盖的内容极为深广,涉及的研究领域交叉性明显,既有宏观的岩性特征和土地利用对侵蚀产沙和养分流失的影响分析,也有径流携带泥沙和养分流失的机理解释,其综合性很强。本专著尽管得以面世,但所谈的问题不过是其十之一二,作者自知学力有限,书中难免存在疏漏与不足之处,敬请广大读者、各位专家和同行提出宝贵意见。

作 者

2018年12月12日于浙江大学紫金港校区

目 录

前言

第 1 章 红壤坡地开发利用现状与水土流失特征	1
1.1 浙江省红壤坡地开发利用现状	1
1.1.1 浙江省红壤区的自然条件	1
1.1.2 浙江省红壤坡地主要开发利用类型	2
1.1.3 浙江省红壤坡地土地利用类型的动态变化	3
1.2 红壤坡地开发过程中的水土流失特征	5
1.2.1 红壤坡地是水土流失发生的主体	6
1.2.2 红壤坡地不同土地利用方式的水土流失强度	7
1.2.3 水土流失与土地利用方式动态变化的耦合性	8
1.2.4 浙江省水土流失特征及成因	9
1.3 红壤坡地侵蚀产沙及养分流失过程研究的重要性	10
1.3.1 研究意义	10
1.3.2 研究内容	11
1.3.3 研究方法	11
主要参考文献	12
第 2 章 试验设计	13
2.1 降雨装置和雨强的选择	13
2.1.1 降雨设备	13
2.1.2 雨强设定	14
2.1.3 降雨均匀度计算	15
2.2 降雨径流场地的设置	16
2.2.1 野外原位试验径流小区的设计	16
2.2.2 室内人工模拟降雨试验径流槽的设计	16
2.3 试验用土要求	18
2.3.1 径流槽试验用土的填充要求	18
2.3.2 试验用土的主要测试指标	18
2.4 试验过程和指标测试	19
2.4.1 试验过程	19
2.4.2 测定指标	19
2.5 本章小结	20
主要参考文献	20
第 3 章 红壤坡地降雨产流过程模拟	21
3.1 坡地降雨的再分配原理介绍	21
3.2 坡度、植被覆盖度和雨强正交组合模拟坡面产流过程	22

3.2.1	试验设计与过程	22
3.2.2	坡面径流形成的三要素分析	22
3.2.3	径流量的变化过程	25
3.2.4	结论	30
3.3	坡长和雨强组合模拟试验条件下的坡面径流过程	31
3.3.1	试验设计	31
3.3.2	室内裸坡产流动态过程的坡长效应	31
3.3.3	雨强和坡长对径流量的综合影响	34
3.4	坡长和植被覆盖度组合模拟试验条件下的坡面径流过程	34
3.4.1	试验设计	34
3.4.2	坡长和覆盖度对初始产流时间的影响	35
3.4.3	坡长与植被覆盖度对径流系数的影响	36
3.4.4	径流模数变化特征分析	36
3.4.5	结论	37
3.5	林地植被立体覆盖情况下的产流过程模拟	38
3.5.1	试验设计	38
3.5.2	室内模拟覆盖降雨试验产流时刻	38
3.5.3	室内模拟覆盖降雨试验产流过程	39
3.5.4	室内模拟覆盖降雨试验产流过程讨论	40
3.6	土壤性质对降雨再分配影响的模拟试验	41
3.6.1	试验设计	41
3.6.2	坡面径流与壤中流的产流过程	42
3.6.3	坡面径流与壤中流的径流系数	45
3.6.4	坡面径流与壤中流的分配与径流模数	46
3.6.5	结论	48
	主要参考文献	48
第4章	典型经济林红壤坡地侵蚀产沙及养分流失过程	50
4.1	竹林坡地侵蚀产沙及养分流失过程模拟	50
4.1.1	研究区概况与试验设计	51
4.1.2	竹林坡地侵蚀产沙过程分析	52
4.1.3	竹林坡地氮磷流失过程分析	57
4.1.4	不同管理方式竹林坡地径流的载荷特征分析	63
4.2	柚子林坡地侵蚀产沙过程模拟	68
4.2.1	试验设计与分析方法	68
4.2.2	柚子林坡地产流过程分析	69
4.2.3	柚子林坡地产沙特征分析	74
4.2.4	不同坡长径流与输沙过程研究	78
4.2.5	结论	80
4.3	柿子林坡地侵蚀产沙及养分流失特征及影响因素	80
4.3.1	研究区域概况材料	80
4.3.2	柿子林坡地的侵蚀产沙的时空分布特征	82
4.3.3	柿子林坡地不同地形部位侵蚀产沙分布特征分析	84

4.3.4 不同林下管理措施对经济林坡地侵蚀产沙影响分析	85
4.3.5 红壤丘陵区经济林坡地的养分流失规律	86
4.3.6 不同林下管理措施对经济林坡地的养分流失的影响分析	89
主要参考文献	90
第5章 不同土地利用背景下坡地侵蚀产沙过程模拟	92
5.1 坡耕地侵蚀产流产沙过程模拟	92
5.1.1 试验设计	92
5.1.2 坡耕地产流动态过程	93
5.1.3 坡耕地侵蚀产沙过程分析	96
5.1.4 不同坡长径流与输沙过程研究	100
5.1.5 坡长和雨强对坡面径流侵蚀产沙过程的综合影响	104
5.1.6 结论	104
5.2 荒草坡地侵蚀产流产沙过程模拟	105
5.2.1 人工模拟降雨试验及过程设计	105
5.2.2 产流时刻与雨强及土壤前期含沙量的关系	106
5.2.3 累积径流量	107
5.2.4 累积产沙量	108
5.2.5 同一坡度、不同雨强的 15min 累积产沙量趋势探讨	109
5.2.6 泥沙粒径问题	110
5.2.7 结论	113
5.3 不同土地利用方式长期侵蚀产沙监测资料的分析	114
5.3.1 试验区概况	114
5.3.2 水土流失监测资料数据库的建立和优势	114
5.3.3 数据分析	116
5.3.4 结论	117
主要参考文献	118
第6章 红壤坡地侵蚀产沙过程及影响因素的室内模拟	119
6.1 坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟	120
6.1.1 试验设计和方法	120
6.1.2 分析要素计算	122
6.1.3 侵蚀产沙与坡面径流水动力学参数的相关性	123
6.1.4 坡面径流水动力学参数对侵蚀产沙的影响	124
6.1.5 坡面侵蚀产沙的多要素综合影响	125
6.1.6 结论	126
6.2 坡面径流含沙量随雨强和坡长变化的动态过程	126
6.2.1 试验设计和方法	126
6.2.2 含沙量随雨强和坡长增加的变化特征	127
6.2.3 含沙量过程波动特征	128
6.2.4 影响含沙量变化的水文要素与水力学特征参数	130
6.2.5 结论	131
6.3 坡长和植被覆盖度对侵蚀产沙过程的影响模拟	132
6.3.1 坡面产流产沙的坡长效应	132

6.3.2	植被覆盖度对坡面侵蚀产流产沙过程的影响	135
6.3.3	降雨过程中坡面土壤颗粒粗化过程研究	139
6.4	雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙的复合影响	143
6.4.1	试验设计和方法	143
6.4.2	雨强与植被覆盖度对产流产沙的影响	143
6.4.3	坡地侵蚀产沙影响因素的权重	145
6.4.4	结论	146
	主要参考文献	147
第7章	侵蚀性红壤坡地土壤养分流失过程模拟	149
7.1	坡度、雨强和植被覆盖特征背景下的坡地土壤氮素流失	149
7.1.1	试验设计及试验结果	149
7.1.2	各形态氮在不同生长期内随径流的流失特征	151
7.1.3	不同生长期内, 场降雨过程中各种氮形态之间的转化	154
7.1.4	径流中不溶态氮对环境的影响	156
7.1.5	白菜整个生长周期内氮的流失量	157
7.1.6	结论	158
7.2	坡度、雨强和植被覆盖特征背景下的坡地土壤磷素流失	158
7.2.1	试验设计	159
7.2.2	不同生长期内 TP 流失特征	159
7.2.3	不同生长期内可溶性磷流失特征	160
7.2.4	产沙量及 PP 的流失特征	162
7.2.5	白菜生长周期内磷素的流失量	164
7.2.6	PP 素流失的影响因素	165
7.2.7	结论	168
7.3	坡长和雨强对氮素流失影响的模拟降雨试验研究	169
7.3.1	试验设计与过程	169
7.3.2	坡长对各形态氮素流失浓度的影响	169
7.3.3	雨强对径流中各形态氮素流失量的影响	171
7.3.4	径流量对径流中各形态氮素总流失量的影响	173
7.3.5	坡长、雨强、径流量对各形态氮素流失的综合影响	173
7.3.6	结论	175
7.4	植被覆盖度和坡长对坡地总磷流失影响的模拟	175
7.4.1	试验设计	176
7.4.2	植被覆盖对坡地 TP 流失的影响	177
7.4.3	坡地总磷流失临界坡长的界定	179
7.4.4	施肥对坡地总磷流失的影响	180
7.4.5	结论	182
	主要参考文献	182
第8章	红壤坡地侵蚀产沙及养分流失模型及模拟	184
8.1	坡面侵蚀产沙模型的建立	184
8.1.1	试验设计	185
8.1.2	模型构建	187

8.1.3 模型验证及模拟	188
8.1.4 结论	189
8.2 坡面土壤养分流失模型的建立和验证	189
8.2.1 坡度、植被覆盖度与雨强综合影响下的氮、磷流失模型	190
8.2.2 坡长、植被覆盖度与施肥处理综合影响下的氮磷流失模型	195
8.3 室内试验数据实际应用的转换模型	202
8.3.1 室内试验数据在生产实际问题中存在的问题——转换系数的提出	202
8.3.2 室内与野外土壤侵蚀产沙模数的换算	203
8.3.3 室内与野外产流模型的修正与转换	206
8.3.4 结论	208
主要参考文献	209
第9章 红壤坡地水力侵蚀的调控及系统优化设计	211
9.1 坡面拦沙蓄水措施的多方位优化组合	211
9.1.1 坡沟系统拦沙排水措施的优化组合	211
9.1.2 不同开发利用情况下生态季节错位的农林复合措施优化设计	212
9.1.3 水土保持生态措施	213
9.2 经济林坡地水土与养分流失控制措施优化设计	215
9.2.1 经济林坡地水土保持措施的空间布设	215
9.2.2 经济林坡地水土保持措施布设的时间设计	216
9.2.3 经济林坡地土壤侵蚀和养分流失综合防治	216
9.3 流域水土流失防护体系的设计	217
9.3.1 流域水源地水土流失防护体系	217
9.3.2 山前丘陵坡地水土流失防护体系	217
9.3.3 滨河谷地水土流失防护体系	218
主要参考文献	218

第 1 章 红壤坡地开发利用现状与水土流失特征

红壤是一种分布在中低纬度地区的典型的地带性富铁铝性土壤，在全球的分布面积约为 $6.4 \times 10^7 \text{km}^2$ ，占全球总面积的 45.2%。我国红壤主要分布在长江以南广阔的低山丘陵区，东起东海诸岛，西达云贵高原及横断山脉，总面积约为 $2.18 \times 10^6 \text{km}^2$ ，约占国土总面积的 1/5 (赵其国, 2002; 曾希柏, 2003)，主要以发育在岩石风化所形成的残积母质层和红色风化壳上的土壤为主，其母岩主要为花岗岩、玄武岩、石灰岩和第四纪红色黏土。红壤区的植被以常绿阔叶林为主，其次为常绿阔叶落叶林和针阔混交林，次生林以马尾松为主，大部分地区年均降水量大于 1000mm。该区的水热条件优越，但人口分布和生产密度都很高，低丘缓坡大都开发为农耕地，并且复播指数和土地利用率高。然而，从新中国成立以来，随经济发展过程的演进，红壤区的土地利用方式经历多次变更和反复，不同的时期存在着不同程度的不合理利用现象。加之，红壤坡地土层薄，由易侵蚀的物质构成，致使红壤区存在不同程度的水土流失问题。

本专著以浙江省为例，针对红壤坡地开发利用方式的动态过程、侵蚀产流产沙机理及侵蚀强度等方面开展系列研究。

1.1 浙江省红壤坡地开发利用现状

1.1.1 浙江省红壤区的自然条件

浙江省位于中国大陆的东南沿海地区，全省地貌类型以山地丘陵为主，“七山一水二分田”是浙江省土地资源构成的真实写照，地形高低起伏，陆地面积小，人口密度大，土地资源相对匮乏，丘陵坡地和台地是浙江省耕地资源和未来开发的主要类型，长期存在着不同程度的水土流失问题。

浙江省的气候属于典型的亚热带东部湿润季风气候，温暖湿润，雨量充沛，年降水量在 1000~2000mm，为全国雨量较多的省份之一。雨量的年内分配为双峰型，一年中有两个相对雨季 (5~6 月的梅雨汛期和 9 月的秋雨期) 和两个相对干季 (7~8 月的盛夏干旱期和 10 月至翌年 2 月的冬旱期)。全年内 60%~70% 的降水集中分布在 5~9 月，降水的年内分配不均，导致了省内径流年内分配的集中性。浙江省的地带性植被应属于亚热带常绿阔叶林、针阔混交林。但由于人多地少，坡地开发力度大，地表植被类型发生了很大的变化，原始的林地所剩无几，人工植被是主体。虽然植被覆盖率很大，其中，森林覆盖率为 58.31%，若加上其他灌木林覆盖率，则森林覆盖率达到 61.04%，但经济林和单一树种的人工林所占比重很大，将林地水土保持的效益大打折扣。

浙江省陆地上的土壤主要有 10 个类型，其中以红壤面积最大，其是构成丘陵山区的主要土壤类型，也是浙江省水土流失较为严重的土壤类型，侵蚀性红壤与其他的侵蚀性土壤类型的面积约占总土地面积的 70%。形成这些土壤的母质主要为基岩风化壳和第四

纪沉积物，其中火成岩风化壳母质是主体，它构成了浙江省土壤类型的母岩，这些风化壳是浙江省典型的地带性土壤——红壤和黄壤发育的母质(全国土壤普查办公室, 1998)。由于火成岩原生节理较少，不利于地下水活动，使风化作用向纵深发展受到了制约，又由于火成岩地貌以山地丘陵为主，坡度相对较大，剥蚀作用强烈，不利于风化壳的保存，所以其形成的风化壳厚度相对较薄，限制了沟谷的发育，土壤侵蚀主要以坡面面蚀为主。

1.1.2 浙江省红壤坡地主要开发利用类型

目前对红壤坡地的开发利用，分为两部分，一是已利用土地，包括农用地和建设用地两大类；二是未利用地，主要包括荒草地、裸地、河流水面、湖泊水面、滩涂。在此基础上对农用地和建设用地再进行具体划分，前者包括耕地、园地、林地、其他农用地；后者包括居民点及独立工矿用地、交通运输用地和水利用地。

根据浙江省水土流失监测数据，目前，浙江省的低丘缓坡的利用率已经很高，开发利用的后备资源非常有限。但是，农用地中，林地的数量最多，为 1495702.71hm²，占总土地资源的 61.89%，特别是存在较多数量的疏林地或迹地(据本次调查，疏林地面积为 369133.3hm²，迹地面积为 14866.7hm²)，开发程度相对较低，因此，有较大的进一步治理开发的潜力(表 1-1)。

表 1-1 浙江省低丘缓坡区各土地利用现状面积汇总表

土地利用类型		≤6°/hm ²	6°~15°/hm ²	15°~25°/hm ²	小计/hm ²
农用地	耕地	303464.92	148904.42	72949.62	525318.96
	园地	70320.45	59151.10	40732.82	170204.37
	林地	133269.31	375630.69	986802.71	1495702.71
	其他农用地	21206.42	2243.04	1680.12	25129.58
	小计	528261.10	585929.25	1102165.27	2216355.62
建设用地	居民点及独立工矿用地	72723.22	34152.51	15499.67	122375.40
	水利用地	29392.13	2363.45	3612.27	35367.85
	交通运输用地	4908.13	1624.94	944.09	7477.16
	小计	107023.48	38140.90	20056.03	165220.41
未利用地	未利用土地	4379.82	4288.72	4813.42	13481.96
	其他用地	15462.97	2849.47	3403.07	21715.51
	小计	19842.79	7138.19	8216.49	35197.47
合计		655127.37	631208.34	1130437.79	2416773.50

从各土地利用类型的坡度分布来看，耕地大部分分布在海拔相对较低、坡度较缓的区域，随着坡度的增大，耕地的比例随之下降。居民点等建设用地及其他农用地也主要分布在海拔较低、坡度较缓的区域。超过 60%的林地分布在坡度 15°~25°的区域。

从低丘缓坡土地利用类型现状来看，农用地(包括耕地、园地和林地)数量最多，占

总土地资源量的 91.71%；其次是建设用地，占总土地资源的 6.83%，两者合计为 98.54%；其余为未利用的土地资源，仅占总土地资源的 1.46%。由此可见，浙江省低丘缓坡的利用率已相当高，开发利用的后备土地资源十分有限。

浙江省按照不同坡度对低丘缓坡地的各土地利用类型进行分析统计见表 1-2。

表 1-2 浙江省低丘缓坡地不同坡度土地利用类型

土地利用	5°~8°/km ²	8°~15°/km ²	15°~25°/km ²	25°~35°/km ²	≥35°/km ²	合计/km ²	比例/%
坡耕地	164.99	434.32	920.62	641.06	134.82	2295.81	26.51
果园	127.29	285.74	437.60	351.02	136.62	1338.27	15.45
茶园	77.94	210.57	389.73	286.55	84.54	1049.33	12.12
其他园地	39.58	79.24	109.82	85.48	35.80	349.92	4.04
竹林	20.20	110.65	687.77	1650.53	1140.43	3609.58	41.68
其他经济林	0.79	1.89	5.05	6.95	2.57	17.25	0.20
合计	430.79	1122.41	2550.59	3021.59	1534.78	8660.16	100

根据表 1-2，竹林在浙江省种植面积是最大的，达到了 41.68%，其次是坡耕地，比例为 26.51%。在这两种土地利用类型中，竹林主要集中在大于 25°的坡地上，而坡耕地主要集中在 15°~35°。一般这两个坡度范围是最易于发生水土流失的。果园和茶园虽然种植面积不是最大，只占到 15.45%和 12.12%，但是其种植区域也主要集中在 15°~35°，所以水土流失的潜在性也是非常大。综合全省来看，土地利用类型主要集中在 15°~35°，以 25°~35°最多，所占比例超过 50%。

1.1.3 浙江省红壤坡地土地利用类型的动态变化

随着农村经济结构的变化，农民对低丘缓坡地的土地利用方式变动频繁，在一种土地利用方式向另一种土地利用方式变动的初期阶段，往往是水土流失极易发生时期。

各土地利用类型在每次普查中分类均不一致，其中 2003 年浙江省对土地利用现状进行了调查统计，将全省土地利用类型分为九大类，其中，耕地面积占 19.3%，园地占 5.4%，林地占 52.9%，牧草地占 0.014%，其他农用地占 4.6%，居民点及工矿用地占 6.3%，交通运输用地占 0.6%，水利设施用地占 1.4%，未利用地占 9.5%。为此，我们选取坡耕地、园地、林地和其他用地共 4 种土地利用方式进行动态变化的过程分析。

浙江省分别在 1987 年、1997 年、2000 年、2004 年和 2009 年利用遥感技术进行过 5 次水土流失监测，数据以各城市、各侵蚀强度等方面为指标进行统计。

根据浙江省 2004~2017 年统计年鉴数据整理得到水果林地和茶园地 13 年来的变化情况(表 1-3)，表中数据显示，从 2004 年以来，水果林地和茶园地的面积一直在增加，将面积随年限变化的数据的 Excel 拟合得到：

$$y_{\text{水果林}} = 2.8308x - 5373.1 \quad R^2 = 0.8657 \tag{1-1}$$

$$y_{\text{茶园}} = 3.906x - 7674.6 \quad R^2 = 0.9517 \tag{1-2}$$

以上两个计算式表示，茶园地面积的增加趋势高于水果林地，而且其相关性很好。水果林地和茶园地面积的逐年增加，反映出其在林地面积中的比例在增大，但其水土保持功能却远小于天然林地。

表 1-3 水果林与茶园地面积的动态变化

年份	水果林地/km ²	茶园地/km ²	年份	水果林地/km ²	茶园地/km ²	年份	水果林地/km ²	茶园地/km ²
2004	2944.2	1479.18	2009	3180.5	1759.29	2014	3300.9	1956.27
2005	2998.1	1546.50	2010	3209.2	1779.27	2015	3325.4	1945.40
2006	3004.5	1586.71	2011	3208.6	1819.58	2016	3276.6	1969.82
2007	3140.3	1689.22	2012	3214.5	1830.26			
2008	3171.3	1740.94	2013	3214.0	1840.35			

同理，统计得出 1978~2016 年以来 38 年间蔬菜与粮食作物播种面积的动态过程，并将数据绘制于图 1-1 和图 1-2 中。

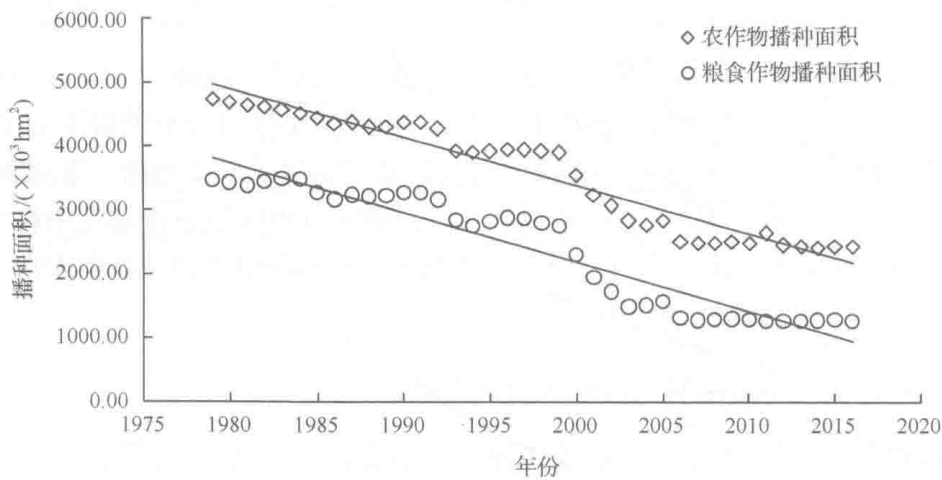


图 1-1 农作物及其中粮食作物播种面积的动态过程

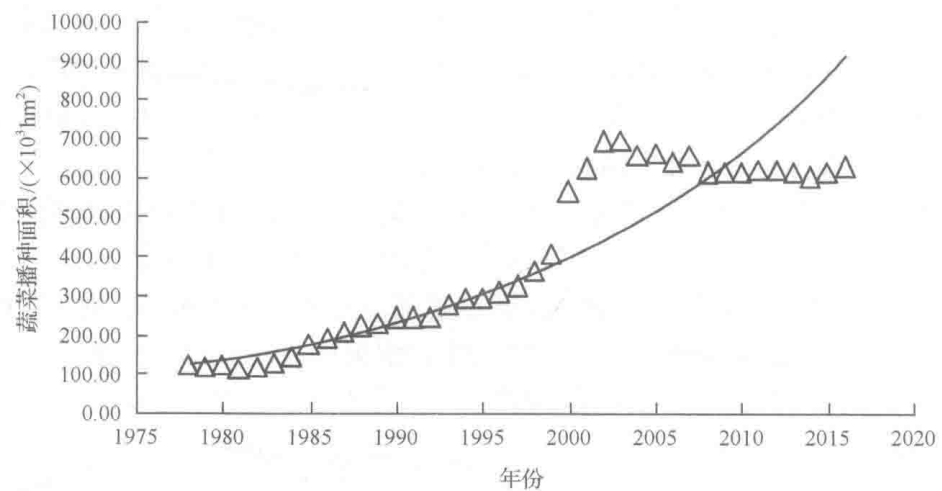


图 1-2 蔬菜播种面积的动态过程

农作物播种面积大幅度下降，主要是由于粮食作物的种植面积在大幅度下降，粮食作物播种面积的下降幅度较农作物播种面积的下降速度快，然而蔬菜作物的播种面积在快速增加，从改革开放的 1978 年到 2003 年，其以指数的方式在增加，随后稳定在 60 万~70 万 hm^2 。蔬菜播种面积的增加一定程度上减缓了农作物播种面积的下降速度。

1.2 红壤坡地开发过程中的水土流失特征

浙江省地属南方红壤丘陵区，浙江省独特的“水”“土”和“植物”的时空组合，决定了浙江省水土流失的特征。浙江省的水土流失类型以水力侵蚀为主，局部地区存在滑坡、泥石流等重力侵蚀，沿海地区还有一定程度的风力侵蚀。侵蚀形式有面状侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀，其面积占全省水土流失面积的 95%以上。其中面状侵蚀是浙江省最为普遍的一种侵蚀方式。就水土流失强度而言，以轻度和中度侵蚀为主，占水土流失面积的 91.32%。从水土流失的发展动态来看，从 1987~2016 年的 30 年间，浙江省水土流失总面积减少了 16894.12km^2 ，平均每年减少 562.47km^2 ，主要以轻度水土流失面积为主。中度以上水土流失面积在不同的年份波动明显，减少的趋势不明显，强度以上水土流失面积整体呈增加的趋势(表 1-4)。

表 1-4 浙江省水土流失遥感普查面积

年份	水土流失面积/ km^2	中度以上侵蚀面积/ km^2	强度以上侵蚀面积/ km^2
1987	25708.00	7531.00	1085.00
1997	18998.25	8964.65	2194.92
2000	16212.35	6207.85	1156.06
2004	13654.13	5855.37	1185.10
2016	8813.88	6244.80	2009.43

比较 2010 年和 2016 年的水土流失强度等级(表 1-5 和表 1-6)面积的变化，可以清楚地发现各强度等级的绝对面积都有不同程度的减少，占全省土地总面积的比例也在下降，除了轻度侵蚀面积略有增加，但是占水土流失总面积的比例却有所增大。从各强度等级面积减少的绝对数据来看，极强烈与剧烈侵蚀的面积降幅不大，降幅最大的是强烈侵蚀等级的面积，轻度侵蚀的面积反而有上升的态势。

表 1-5 浙江省 2010 年水土流失总体状况

面积类别	水土流失等级					
	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	小计
面积/ km^2	2443.65	4462.45	1479.18	828.46	179.16	9392.88
占土地总面积/%	2.36	4.31	1.43	0.8	0.17	9.06
占水土流失面积/%	26.02	47.51	15.75	8.82	1.91	100

表 1-6 浙江省 2016 年水土流失总体状况

面积类别	水土流失等级					
	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	小计
面积/km ²	2569.08	4235.37	1016.02	818.31	175.10	8813.88
占土地总面积/%	2.43	4.01	0.96	0.78	0.17	8.35
占水土流失面积/%	29.15	48.05	11.53	9.28	1.99	100

1.2.1 红壤坡地是水土流失发生的主体

红壤为浙江省分布面积最大、范围最广的土壤类型，其分布面积达 $3.88 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，占全省土壤总面积的 40.06%，主要广泛分布在低山丘陵与台地类型区，是浙江省茶、果等经济特产，玉米、番薯等旱粮作物，以及松、杉、竹等用材林的主要生产基地。

红壤形成的环境条件，决定了其在发育过程中，经历了强风化和强淋溶作用，使其具有黏、酸、瘦等主要特征。浙江省的红壤质地为壤质黏土，黏粒中铁铝氧化物含量较高，而腐殖质含量较低，使得红壤的田间持水量小，凋萎系数大，有效水少，在旱季保水性很差，不适于作物高产。

不同母质发育的红壤，由于风化壳发育阶段不同、矿物组成不同、富铝化程度不同，其在土层厚度和抗蚀性方面形成了明显的差异。由玄武岩等基性岩发育的红壤，其淋溶系数、分布系数、铝化和铁化系数的相对值都高于由花岗岩等酸性岩发育的红壤。

红壤原生植被为亚热带常绿阔叶林，每年凋落于地表的枯枝绿叶干物质，提供了土壤物质循环与养分富集的基础。但由于浙江省人口多，土地面积少，坡地的人为开发利用强度大，目前红壤坡地是浙江省主要的坡耕地分布区，人工植被成为主体，植被稀疏，使得红壤坡地成为浙江省水土流失的主要发生区，从而导致红壤坡地耕层土层变薄，肥力下降，蓄水保水性能极差，水土流失渐趋严重。

2009 年浙江省水土流失遥感普查结果显示，全省共有水土流失面积 13654.13km^2 ，占全省土地总面积的 12.95%。其中， $<8^\circ$ 的坡地水土流失面积占到 10.3%， $8^\circ \sim 25^\circ$ 的坡地水土流失面积占到 57.4%， $>25^\circ$ 坡地的水土流失面积占到 32.3%。地形坡度是水土流失发生的基本条件，根据不同坡度面积的水土流失面积比率（水土流失率）计算，也明确显示全省水土流失区主要集中在 $8^\circ \sim 25^\circ$ 的坡地，即主要是红壤坡地分布区。

从水土流失的强度来看，强度水土流失面积 743.37km^2 ，主要发生在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 的坡地；极强度水土流失面积 306.50km^2 ，集中发生在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 的坡地（表 1-7）。

表 1-7 浙江省不同坡度水土流失各强度水土流失面积

坡度	轻度/km ²	中度/km ²	强度/km ²	极强度/km ²	剧烈/km ²	小计/km ²	比例/%
$<8^\circ$	1368.03	42.66	0.04	0.00	0.01	1410.74	10.3
$8^\circ \sim 15^\circ$	2303.38	516.58	0.03	0.00	0.00	2819.99	20.7
$15^\circ \sim 25^\circ$	4126.30	212.02	670.25	0.05	0	5008.62	36.7
$25^\circ \sim 35^\circ$	0.74	2343.69	41.79	287.85	0.03	2674.10	19.6
$\geq 35^\circ$	0.31	1555.32	31.26	18.60	135.19	1740.68	12.7
小计	7798.76	4670.27	743.37	306.50	135.23	13654.13	100.0

1.2.2 红壤坡地不同土地利用方式的水土流失强度

浙江省 2009 年和 2004 年红壤坡地的土地利用类型, 以及各类型中水土流失的程度与面积, 见表 1-8 和表 1-9。

表 1-8 2009 年浙江省不同土地利用方式下按照流失程度的流失面积

土地利用	水土流失面积						比例/%
	轻度/km ²	中度/km ²	强度/km ²	极强度/km ²	剧烈/km ²	小计/km ²	
坡耕地	220.37	487.01	933.43	570.16	84.84	2295.81	22.72
果园	206.35	103.49	9.18	2.53	0.27	321.82	3.19
茶园	132.72	98.51	12.60	2.86	0.14	246.83	2.44
其他园地	46.70	24.98	2.86	0.63	0.17	75.34	0.75
竹林	59.82	189.18	5.11	2.37	0.47	256.95	2.54
其他经济林	1.98	1.38	0.13	0.01	0.01	3.51	0.03
林地、工矿用地等	2418.52	3634.93	513.46	245.03	92.96	6904.90	68.33
合计	3086.46	4539.48	1476.77	823.59	178.86	10105.16	100.00

表 1-9 2004 年浙江省不同土地利用方式下按照流失程度的流失面积

土地利用	水土流失面积						比例/%
	轻度/km ²	中度/km ²	强度/km ²	极强度/km ²	剧烈/km ²	小计/km ²	
坡耕地	264.27	362.69	503.30	197.40	90.48	1418.14	10.39
园地	410.67	114.14	10.12	3.42	0.98	539.33	3.95
林地	6546.12	3928.23	197.55	90.50	37.94	10800.34	79.10
草地	266.86	93.62	6.77	3.08	1.05	371.38	2.72
工矿地	17.95	12.39	2.21	0.62	0.19	33.36	0.24
荒草地	104.02	55.32	4.48	1.61	0.47	165.90	1.22
裸土地	3.36	1.13	0.18	0.13	0.07	4.87	0.04
裸岩地	34.34	25.69	2.69	1.67	0.54	64.93	0.48
其他	151.17	77.06	16.07	8.07	3.51	255.88	1.87
合计	7798.76	4670.27	743.37	306.50	135.23	13654.13	100.00

从表 1-8 可以看出, 坡耕地主要发生的侵蚀强度为强度侵蚀和极强度侵蚀, 分别达到 933.43km²和 570.16km²。果园、茶园、其他园地、竹林及其他经济林的侵蚀程度均以轻度侵蚀和中度侵蚀为主。林地、工矿用地等的侵蚀虽然也以轻度和中度侵蚀为主, 但是其绝对面积大, 分别达到 2418.52km²和 3634.93km², 侵蚀危害不容忽视。从全部侵蚀强度来看, 林地、工矿用地等的流失面积比例也是最大, 达到 68.33%, 坡耕地次之, 达到 22.72%。

从表 1-9 可以看出, 林地水土流失面积在浙江省总的流失面积里占有绝对优势, 比例高达 79.10%, 坡耕地次之, 比例达到 10.39%。