



沟壑整治工程 优化配置与建造技术

曹文洪 李占斌 陈丽华 张晓明 李 鹏 著

武汉工业学院图书馆



01373625



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

沟壑整治工程 优化配置与建造技术

曹文洪 李占斌 陈丽华 张晓明 李 鹏 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书围绕黄土高原地区沟壑整治工程规划、布局、设计、建造、管理与评价等理论和技术,在沟壑整治工程优化配置的理论与模型、潜力与能力、技术与模式、方案与评价,以及沟壑工程新型设计与建造、施工与管理、效益与评价等方面开展了研究。本书研究成果对实现水土资源的高效利用,对促进当地农业增产、农民增收、农村经济发展,巩固退耕还林成果,改善生态环境,有效减少入黄泥沙,确保黄河安澜,全面建设小康社会具有重大的现实意义。

本书适合水利行业相关专业的科研人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

沟壑整治工程优化配置与建造技术 / 曹文洪等著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-5084-9587-3

I. ①沟… II. ①曹… III. ①黄土高原—沟壑—水土
保持—综合治理—研究 IV. ①S157.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第051843号

书 名	沟壑整治工程优化配置与建造技术
作 者	曹文洪 李占斌 陈丽华 张晓明 李鹏 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 21.25印张 503千字
版 次	2012年4月第1版 2012年4月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	80.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

黄土高原丘陵沟壑区，自然条件复杂，是我国生态环境脆弱和水土流失最为严重的地区。严重的水土流失不仅制约着当地农业生产和经济发展，导致当地生态环境不断恶化，而且输入黄河大量泥沙，给黄河下游两岸人民的生命、财产安全带来严重的洪灾威胁。

黄土高原丘陵沟壑区地貌的突出特点是“千沟万壑、支离破碎”。沟道是地表径流的通道，也是地表水、地下水的主要交互带，又是土壤侵蚀主要发生地，是黄河泥沙的主要来源区。长期的定位观测和实验研究结果表明，在黄土高原丘陵沟壑区流域侵蚀产沙中，沟道侵蚀产沙量占总侵蚀量的60%以上。在长期水土流失治理的实践中，形成了以生物措施、耕作措施和工程措施为主的综合治理体系。淤地坝作为主要的工程措施，利用水土流失的自然过程，集大面积上的水、沙、肥在坝地上使用，从而获得高产稳产的农业，深受黄土高原地区群众的喜爱；同时淤地坝可以迅速地拦截泥沙，减少河道淤积，又为黄河治理所急需。淤地坝有机地统一了当地致富、生态环境建设和治黄的关系。因此，以淤地坝为核心的沟道治理工程是黄土高原水土流失治理的关键措施。

建设社会主义新农村，消除贫困，构筑和谐社会和改善生态环境，对水土流失治理提出了新的、更高的要求。黄土高原地区沟道治理不仅只是修建淤地坝淤地造田，而且是利用淤地坝调控流域水资源配置，高效利用水土资源。因此，针对要建设和谐生态环境，又缺乏技术支撑的现实，科技部将“沟壑整治工程优化配置与建造技术”列为“十一五”国家科技支撑计划课题（编号2006BAD09B02），开展沟壑整治开发与工程优化配置建设技术研究，以揭示沟道侵蚀的动力学过程、小流域水力调控模拟理论与方法、沟壑整治的环境效应评价等基础科学问题，解决沟道生态环境建设过程中存在的沟道工程规划、设计、施工、管理等问题，积极探索淤地坝及其坝系优化配置，调控流域水土资源，实现水土资源的高效利用。课题研究成果对农村经济发展，巩固退耕还林成果，改善生态环境，确保黄河安澜有重要意义。

本书相关研究和出版得到了“十一五”国家科技支撑计划课题（编号2006BAD09B02）“沟壑整治工程优化配置与建造技术”与“流域水环境模拟与调控国家重点实验室”的资助，在此衷心表示感谢。参加本书编写及课题研究的主要人员包括：曹文洪、李占斌、陈丽华、张晓明、李鹏、高凌、刘春晶、祁伟、鲁克新、张翔、沈中原、刘卉芳、侯建才、朱毕生、魏霞、解刚、杨启红、朱冰冰等。

课题组人员经过5年的艰辛探索和研究，课题取得了多项创新性成果，可概括为：四项理论研究的进展、三个模型的建立、六项新技术的开发、五项技术模式的推广。本课题在国内外期刊上发表学术论文100余篇，国内外学术会议特邀报告10余篇，出版专著2部，获得国家发明专利6项和实用新型专利1项，提出技术规程3项，参与制定国家标准4项，建立试验示范基地3个。

鉴于黄土高原问题的复杂性及作者水平的局限，书中难免出现疏漏或谬误之处，敬请读者批评指正。

作 者

2012年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流域水文生态过程研究	1
1.1.1 流域降水与径流	1
1.1.2 生态水文过程研究	2
1.1.3 流域泥沙来源研究	4
1.1.4 水文模型研究进展	5
1.2 坡沟系统侵蚀产沙研究	6
1.2.1 坡沟系统侵蚀理论基础	6
1.2.2 坡面侵蚀对沟道侵蚀的作用	7
1.3 淤地坝对水沙资源的调控及坝系稳定研究	8
1.3.1 淤地坝对水沙资源的调控研究	8
1.3.2 基于土地利用变化的淤地坝坝系规划研究	8
1.3.3 建坝顺序及建坝间隔	9
1.3.4 坝系稳定性研究	9
1.3.5 GIS 及其模型在淤地坝设计中的现状及展望	10
1.4 沟道工程对径流泥沙的影响研究	10
1.4.1 沟道工程对径流的影响	11
1.4.2 沟道工程对泥沙的影响	12
第 2 章 流域次暴雨水沙响应模型	13
2.1 径流侵蚀功率的理论基础	14
2.2 流域次暴雨水沙响应模型的建立	14
2.2.1 岔巴沟流域概况	15
2.2.2 次暴雨水沙响应关系的建立及验证	15
2.2.3 基于径流侵蚀功率的流域次暴雨水沙响应模型	18
2.3 径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用	19
2.3.1 概述	19
2.3.2 研究区域概况	19
2.3.3 坡面次暴雨水沙响应关系的建立	19

2.4	不同空间尺度次暴雨径流侵蚀功率与降雨侵蚀力对比研究	21
2.4.1	概述	21
2.4.2	研究结果与分析	22
2.5	流域次暴雨水沙响应关系的验证	24
2.5.1	蛇家沟及团山沟流域	24
2.5.2	南小河沟流域	25
2.5.3	纸坊沟流域	27
2.5.4	窟野河流域	28
2.5.5	三川河流域	29
2.5.6	典型对比流域	31
2.5.7	大理河流域	34
2.6	不同尺度流域次暴雨水沙响应关系分析	35
第3章	流域地貌形态特征量化及其与侵蚀产沙耦合	37
3.1	地貌形态特征三维分形信息维数测定方法	37
3.1.1	三维分形 GIS 实体的创建	38
3.1.2	三维分形 GIS 实体的虚拟量化	40
3.1.3	三维分形 GIS 扫描	41
3.1.4	线性回归	44
3.1.5	标度归一	44
3.2	典型流域地貌分形量化	47
3.2.1	岔巴沟流域简介	47
3.2.2	水文泥沙控制站与水沙特性数据的收集	48
3.2.3	岔巴沟流域地貌分形特征	53
3.3	岔巴沟流域次降雨侵蚀产沙地貌临界计算	55
第4章	流域降雨水沙过程及分布式模型研究	63
4.1	降雨径流、侵蚀产沙的物理过程和力学机理	63
4.1.1	有效降雨过程	63
4.1.2	植物截留过程	64
4.1.3	土壤入渗过程	64
4.1.4	地表径流过程	65
4.1.5	土壤侵蚀过程	66
4.1.6	径流输沙过程	66
4.1.7	流域产沙过程	66
4.2	场暴雨小流域降雨径流和侵蚀产沙分布式模型建立	67
4.2.1	流域网格的划分	67
4.2.2	模型建立	67

4.2.3 模型的验证	68
4.3 基于分布式模型的水土保持措施减水减沙效益评价	70
4.3.1 减水减沙方案设计	70
4.3.2 减水减沙效益评价	71
4.3.3 流域配置措施优化	75
4.4 淤地坝子模型	76
4.4.1 “一大件”结构	76
4.4.2 “两大件”结构	77
4.4.3 “三大件”结构	78
第5章 小流域侵蚀产沙特征示踪研究	80
5.1 流域泥沙来源示踪研究技术原理	80
5.1.1 典型淤地坝的选取	80
5.1.2 坡地及淤积层土样选取及其干容重测定	82
5.1.3 淤地坝淤积信息观测与分析	82
5.1.4 典型坝淤积信息与侵蚀性降雨响应关系	83
5.1.5 淤积信息的剖面分布规律	85
5.2 流域侵蚀产沙特征示踪分析	86
5.2.1 研究区背景值的确定	86
5.2.2 流域不同地貌部位侵蚀产沙来源示踪分析	87
5.2.3 流域不同土地利用类型侵蚀产沙来源示踪分析	92
5.3 小流域侵蚀产沙来源示踪	93
5.3.1 流域侵蚀产沙来源	93
5.3.2 典型降雨事件下流域主要侵蚀产沙来源变化	94
5.3.3 降雨侵蚀产沙与淤积泥沙对比分析	96
5.4 流域侵蚀产沙特征演变	97
5.4.1 基于流域定位实测资料的流域侵蚀产沙演变	97
5.4.2 基于黄土高原土壤流失方程的流域侵蚀产沙模数计算	98
5.4.3 基于淤地坝淤积信息的淤地坝坝控流域侵蚀产沙演变	103
5.4.4 流域土壤侵蚀模数确定方法比较	104
第6章 流域坡沟系统重力侵蚀模拟与调控	106
6.1 重力侵蚀数值分析原理	107
6.1.1 滑坡稳定分析中的极限平衡方法	107
6.1.2 有限差分强度系数折减法基本原理	107
6.1.3 崩塌滑坡的蒙特卡洛概率计算	108
6.1.4 FLAC ^{3D} 数值模拟原理	109
6.1.5 坡沟系统作用力	109
6.1.6 Rosenblueth矩估计方法的基本原理	111

6.2 坡沟系统重力侵蚀数值模拟研究	114
6.2.1 研究区概况	114
6.2.2 坡沟系统概化模型及有限差分计算模型	114
6.2.3 土体物理力学指标	115
6.2.4 数值计算过程	116
6.2.5 坡沟系统稳定性变化特征	116
6.2.6 坡沟系统位移场分布模拟	117
6.2.7 坡沟系统应力场分布模拟	119
6.2.8 坡沟系统塑性区分布模拟	120
6.3 小流域重力侵蚀数值模拟研究	121
6.3.1 复杂地形的 FLAC ^{3D} 建模方法	121
6.3.2 小流域概化模型及有限差分计算模型	122
6.3.3 小流域重力侵蚀发育情况	123
6.3.4 小流域位移场分布模拟	123
6.3.5 小流域应力场分布模拟	126
6.3.6 小流域塑性区分布模拟	126
6.3.7 Rosenblueth 矩估计方法计算	127
6.4 淤地坝对小流域重力侵蚀的调控作用	128
6.4.1 淤地坝小流域有限差分计算模型	128
6.4.2 淤地坝对位移场分布调控作用	128
6.4.3 淤地坝对应力场分布调控作用	130
6.4.4 淤地坝对塑性区分布调控作用	131
第7章 流域坝系工程优化模拟	133
7.1 坝系规划方法研究进展	133
7.2 韭园沟坝系建设情况	134
7.3 坝系优化非线性规划研究	135
7.3.1 建模方法	135
7.3.2 坝系优化非线性规划模型	140
7.3.3 建坝顺序优化模型	141
7.3.4 非线性优化规划结果	142
7.3.5 建坝顺序优化计算及结果	148
7.4 坝系防洪标准研究	149
7.4.1 关于坝系防洪标准问题	149
7.4.2 相对稳定坝系防洪标准研究方法	150
7.4.3 模型设计	151
第8章 淤地坝规划与规模布局新技术	154
8.1 淤地坝规划建设中的技术问题	154

8.1.1	淤地坝坝系的相对稳定	154
8.1.2	淤地坝洪水设计标准和达标淤地坝的处理标准	156
8.1.3	淤地坝淤满再用还是随淤随用	157
8.2	新时期淤地坝建设指导思想	158
8.3	淤地坝规模布局技术研究	159
8.3.1	建坝规模潜力分析	159
8.3.2	减沙需求的建坝规模分析	161
8.3.3	延安市拟建淤地坝规模确定	163
第9章	淤地坝快速施工技术	164
9.1	水坠坝坝体排水系统技术优点	165
9.1.1	适用性	165
9.1.2	可行性	165
9.1.3	功效性	165
9.2	水坠坝坝体排水系统技术内容	165
9.2.1	技术系统实施背景	165
9.2.2	技术方案	167
9.2.3	技术实施	167
9.3	水坠坝坝体排水系统技术应用效果	168
9.3.1	表面观察	169
9.3.2	施工速度	169
9.3.3	经济性比较	170
9.3.4	推广前景	170
9.4	淤地坝坝体排水中的新材料应用	170
第10章	淤地坝放水建筑物结构优化技术	171
10.1	淤地坝放水建筑物型式	171
10.1.1	卧管式放水工程	171
10.1.2	竖井式放水工程	171
10.2	放水工程具体实用新型设计	172
10.3	新型放水工程水力试验	174
10.3.1	宋家沟淤地坝实体概况	174
10.3.2	放水工程的水力设计要求	176
10.3.3	模型及试验方案设计	176
10.3.4	流量系数方法	178
10.3.5	水力试验结果与分析	180
第11章	淤地坝结构设计与施工管理技术	184
11.1	淤地坝卧管结构设计	184
11.1.1	淤地坝卧管结构设计	184

11.1.2	卧管横断面尺寸设计	185
11.1.3	消力池横断面尺寸设计	185
11.1.4	方形卧管与消力池盖板厚度设计	185
11.1.5	方形卧管侧墙厚度设计	186
11.2	淤地坝涵洞结构设计	186
11.2.1	方形涵洞盖板厚度设计	186
11.2.2	圆形涵洞壁厚设计	187
11.2.3	圆形涵洞配筋设计	187
11.3	淤地坝卧管设计具体实例	187
11.3.1	卧管放水孔直径确定	187
11.3.2	卧管断面尺寸设计	188
11.3.3	消力池断面尺寸	191
11.3.4	方形卧管与消力池盖板厚度	191
11.3.5	方形卧管侧墙、基础尺寸	195
11.3.6	消力池侧墙、基础尺寸	197
11.4	淤地坝涵洞结构设计具体实例	198
11.4.1	涵洞断面尺寸	198
11.4.2	方形涵洞盖板厚度	201
11.4.3	方涵侧墙、基础尺寸	204
11.4.4	圆涵壁厚及配筋	205
11.5	淤地坝施工的破土面及坝体绿化技术	209
11.6	生态淤地坝的“随淤随用”	209
第 12 章	黄土丘陵沟壑区水土资源开发利用模式	211
12.1	常规农林业利用模式——安家沟流域	212
12.1.1	常规农林业利用模式评价指标体系建立及解析	212
12.1.2	典型区概况	214
12.1.3	评价指标权重的确定	214
12.1.4	评价结果及分析	217
12.2	科技示范综合利用模式——定西西川旱地高效农业科技园	218
12.2.1	科技示范利用模式评价指标体系建立及解析	218
12.2.2	典型地区概况	221
12.2.3	评价指标权重的确定	222
12.2.4	评价结果及分析	224
12.3	特色农业模式——定西马铃薯特色农业	225
12.3.1	特色农业利用模式评价指标体系的建立及解析	225
12.3.2	典型地区概况	227
12.3.3	评价指标权重的确定	228
12.3.4	评价结果及分析	229

12.4 生态旅游利用模式——平凉市田家沟流域·····	231
12.4.1 生态旅游利用模式评价指标体系的建立及解析·····	231
12.4.2 典型区概况·····	233
12.4.3 评价指标权重的确定·····	233
12.4.4 评价结果及分析·····	235
第13章 黄土丘陵沟壑区坝系多目标开发统筹规划模式·····	239
13.1 坝系多目标开发规划内涵·····	239
13.1.1 农业开发规划·····	239
13.1.2 林业开发规划·····	240
13.1.3 草畜开发规划·····	241
13.1.4 沟壑坝系景观开发规划·····	242
13.2 安家沟流域坝系多目标开发统筹规划·····	242
13.2.1 安家沟流域概况·····	242
13.2.2 多目标规划·····	243
13.2.3 多目标开发·····	248
第14章 黄土丘陵沟壑区坝地开发利用模式·····	250
14.1 坝地引水灌溉模式·····	250
14.1.1 发展坝地引水灌溉模式的意义·····	250
14.1.2 发展坝地引水灌溉模式的目的·····	251
14.1.3 坝地引水灌溉技术模式·····	251
14.1.4 坝地引水灌溉效益分析·····	253
14.2 坝地养鱼模式·····	255
14.2.1 发展坝地养鱼模式的意义·····	255
14.2.2 发展坝地养鱼模式的目的·····	255
14.2.3 坝地养鱼技术模式·····	256
14.2.4 坝地养鱼主要技术措施·····	256
14.2.5 坝地养鱼需注意的问题·····	257
14.2.6 坝地养鱼效益分析·····	258
14.3 坝地苜蓿种植模式·····	259
14.3.1 发展坝地苜蓿种植模式的意义及目的·····	259
14.3.2 技术原理·····	259
14.3.3 技术规程·····	260
14.3.4 效益分析·····	264
14.4 坝地马铃薯种植模式·····	265
14.4.1 技术目标·····	265
14.4.2 技术原理·····	265
14.4.3 技术方案·····	266

14.4.4	技术规程	267
14.4.5	效益分析	269
14.5	坝地油菜栽培技术	270
14.5.1	技术目标	270
14.5.2	技术原理	270
14.5.3	技术规程	271
14.5.4	效益分析	273
第 15 章	沟壑整治工程的环境效应研究	274
15.1	流域沟壑整治工程对水沙资源的调控机制	274
15.1.1	流域径流和泥沙对降雨的响应研究	274
15.1.2	流域径流和泥沙对不同的土地利用响应研究	278
15.1.3	土地利用及降雨的减沙理水耦合效应	281
15.1.4	流域尺度变化对流域径流的影响	288
15.1.5	淤地坝对水沙资源的调控效应	290
15.1.6	不同治理方式下的流域侵蚀强度变化	296
15.2	沟壑开发整治工程环境效应评估	298
15.2.1	评价指标的选择与指标体系构建	298
15.2.2	淤地坝建设环境效应评估指标权重分析	304
15.2.3	淤地坝建设环境效应指标筛选及权重分析	311
15.2.4	淤地坝建设环境效应指标计算方法及评估标准	315
	参考文献	317

第 1 章 绪 论

1.1 流域水文生态过程研究

1.1.1 流域降水与径流

降水是产流的主要输入项,对产流的影响也大,特别是降水的时空变化对产流具有决定性作用。降水量与降水强度是影响径流的两个主要因素。降水量与地表径流量的关系不论是在小流域还是在大流域都有密切关系。有学者指出,小雨量时直接径流与降水量之间呈指数关系,而雨量较大时,两者之间为线性关系,但雨量急剧增大时,直接径流率逐渐减小,最后趋近一固定值(中野秀章,1983)。降雨是影响侵蚀的主要动力因素之一,在天然降雨雨滴特性(牟金泽、孟庆枚,1983;江忠善、李秀英,1985)、降雨动能(周佩华等,1981)、侵蚀性暴雨(张汉雄,1983;周佩华、王占礼,1987)研究中取得明显进展。

降雨侵蚀力反映了降雨引起土壤侵蚀的潜力。客观准确的预报降雨侵蚀力,分析其季节变化对于定量预报黄土高原水土流失、进行水土保持具有重要意义。降雨侵蚀力与降雨量、降雨历时、降雨强度和降雨动能有关,反映了降雨特性对土壤侵蚀的影响。国内对降雨侵蚀力(R)有大量研究。其中,估算年降雨侵蚀力值多采用年雨量和月雨量因子两种方法(张光辉,2001)。王万忠等研究认为,最大 30min 雨强可以作为我国降雨侵蚀力计算的最佳参数,并建立了次降雨侵蚀力、年降雨侵蚀力和多年平均降雨侵蚀力的简易计算方法(王万忠、焦菊英,1996)。国内其他一些研究(吴素业,1992;黄炎和等,1993)以 EI 结构形式为基础,提出了针对具体区域的 R 值的计算方法,但在其他地区推广使用受到限制。由于降雨侵蚀力因子具有较强的地域性,开展对比性研究则是一项长期工作。

降水径流形成过程通常可以归结为产流和汇流两个阶段,前者是由次洪降水量预报所形成的产流量(净雨量),后者将产流量变为出口断面的流量过程。径流的形成是一个错综复杂的物理过程,为了了解降雨径流的机理,径流理论应运而生。径流理论是在 19 世纪以后逐步建立和发展起来的,旨在探讨不同气候和下垫面条件下降雨径流形成的物理机制、不同介质中水流汇集的基本规律以及产汇流计算方法的基本原理,是研制确定性水文模型、短期水文预报方法和解决许多水文、水资源实际问题的重要理论依据。

国内 20 世纪 60 年代初,中国水文学者通过对大量实测水文资料的分析研究,得出了湿润地区以蓄满产流为主和干旱区以超渗产流为主的重要论点,建立了实用的流域产流量计算方法,从而使霍顿产流理论在实际中得到了较为广泛的应用。60 年代末期中国水文学者对马斯京根法的理论解释和提出了长河段连续演算方法等,已成为现行实用汇流计算方法的基础。到 70 年代以来,径流理论发展的主要标志是《动力水文学》(Dynamic Hy-

drology)、《水文系统线性理论》(The Liner Theory of Hydrology Systems)、《山坡水文学》(Hillslope Hydrology)等一批中外学术专著的相继问世,以及非霍顿产流理论、计算河流水力学和地貌瞬时单位线等理论的先后提出,表明产汇流理论已经进入成熟期。

1.1.2 生态水文过程研究

生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系(夏佰成等,2004),它是揭示生态格局和生态过程变化水文机理的关键。不同时空尺度上和一系列环境条件下的生态水文过程研究是生态水文学的一个重要研究方向。从生态水文过程对物质的运移和转化作用着手,研究其发生发展规律,调整人类活动,与自然为善,对流域的生态水文过程进行合理修复和改进,以使水环境系统沿着持续发展途径演化(王根绪等,2005)。因此,研究生态水文过程可以为合理生态水文格局的构建和水资源的持续利用提供理论支持(张晓明,2007),生态水文过程的剖析与调节被认为是实现水资源可持续发展的关键所在(王根绪等,2001)。

生态水文过程研究包括生态水文化学过程、生态水文物理过程及其生态效应。生态水文化学过程是指水质性研究;生态水文物理过程主要是指土地利用和植被覆盖对降雨、径流、蒸发等水分要素的影响;而水分生态效应主要指水分行为对植被生长和分布的影响。本书主要对生态水文物理过程进行研究,分析土地利用和植被覆盖对径流的影响。

1. 土地利用/覆被变化(LUCC)的水文效应研究

土地作为人类及其他生物生存与发展的载体,在人为与自然双重因子的相互作用下,不断发生变化。为了更好地理解与认识 LUCC 变化过程、机理以及对人类社会与环境产生的影响,实现对 LUCC 未来发展趋势的预测和调控,为区域可持续发展提供决策依据,必须开展全球变化情景下土地利用/覆盖变化的机制研究,掌握人类活动—土地利用/覆盖变化—全球变化—环境反馈之间的相互关系(王秀兰、包玉海,1999;傅伯杰等,1999;李秀彬,1996)。我国关于 LUCC 的研究已经取得丰硕的成果(张懿锂等,2000;蔡运龙,2001;陈军锋、李秀彬,2001;史培军等,2000;王根绪,2005)。

土地利用/覆被变化直接体现和反映了人类活动的影响水平,对水文过程的影响主要表现为对水分循环过程及水量水质的改变作用方面(Bronstert 等,2002),最终结果直接导致水资源供需关系发生变化,从而对流域生态和社会经济发展等多方面具有显著影响(Calder,2000)。Calder(2000)认为,影响水文的主要土地利用/覆被变化是造林和毁林、农业开发的增强、湿地的排水、道路建设以及城镇化等。虽然这些现象和过程从地方到全球所有的空间尺度都存在,但区域和地方尺度土地利用覆被变化是全球变化最重要的来源与驱动力,因此,研究区域尺度对于进一步理解全球变化的原因和影响及其过程是至关重要的。流域是与水有关的区域尺度研究的最佳单元,因为它代表了水与自然特征、人类水土资源利用相关的物质迁移的自然空间综合体。近几十年来,流域土地利用/覆被变化的水文效应研究越来越成为人们普遍关注的焦点。

黄土高原环境脆弱多变,受气候变化和社会经济高速发展的影响,生态水文问题的恶化尤为突出。近年来,该地区人口总量及密度迅速增加,工业发展、城市扩张、消费水平不断提高以及对土地资源和水资源的过度、不合理利用,又进一步加剧了这里的水危机。

因此,在黄土高原区开展 LUCC 对生态水文过程的影响研究,评价未来不同气候、不同土地利用情景下的生态水文过程及水资源安全,提出相应的技术措施和政策对策,既能丰富全球变化和生态水文学的理论,还能为政府制定区域发展政策或区域规划提供科学依据,具有重要的理论和实践价值。此外,由于黄土高原区水资源的安全问题与区域和局部生态水文状态和过程密切相关,在前所未有的气候变化和 LUCC 背景下,就更加迫切需要研究黄土高原区未来不同土地利用情景下的生态水文特征与趋势,正确评估人类活动改变土地利用方式对流域水循环、水资源的影响程度(尹婧,2008)。

随着计算机科学、地理信息系统与遥感技术的发展,研究 LUCC 与水文循环的关系由传统的统计分析方法转向水文模型方法。传统的集总式水文模型把整个流域作为一个单元,但它不能处理不同的土地利用类型和水文过程的区域差异以及流域参数的变化性。近年来,空间分布式水文模型取得了长足的发展,能够充分反映降雨因子和下垫面条件的空间分异性,真实模拟流域的产流产沙过程(王中根等,2003、2007),不仅有助于深入理解流域的产流产沙过程,而且还可以用于模拟不同土地利用方式下径流泥沙的响应,为土地利用的径流泥沙响应研究提供有效的途径。

2. LUCC 的水文效应研究方法

从研究方法上来看,土地利用/土地覆被变化在流域范围内水文效应的研究早期大都采用实验流域的方法,包括以下 4 种:控制流域法、单独流域法、平行流域法和并列流域法。虽然这些方法都有利于揭示土壤、植被、大气相互作用的机理,但很难在大尺度上定量评估土地覆被变化的水文效应。自 1970 年以来,土地利用/覆被变化的水文响应研究由传统的统计分析方法转向水文模型方法。OnsLad 和 Jamieson 于 1970 年最先尝试运用水文模型预测土地利用变化对径流的影响。水文模型种类很多,大致分为集总式模型、经验统计模型和空间分布式模型。

集总式水文模型如 HBV、CHARM、SCS 模型等将整个流域作为一个单元,表现整个流域的有效反应。由于集总式水文模型适用于土地利用/覆被类型比较单一的小尺度流域,模型参数往往无物理意义,需通过参数率定求出。因此,其致命的弱点在于不能处理不同土地利用类型和水文过程的区域差异以及流域参数的变化性。而经验水文模型的计算过程无明确的物理法则,在土地利用/覆被变化水文效应研究中应用很少。基于物理过程的分布式(或半分布式)水文模型能明确地反映出空间变异性,在解释和预测土地利用变化的影响上有着重要的应用,如模拟山区森林流域土地覆被变化水文影响的地形指数模型(TOPMODEL),评价不同降雨、气候和土地利用组合的流域响应模型 PRMS,研究长时期宏观尺度(或大中尺度)流域土地利用/覆被变化水文效应模型 CLASSIC、J200015、SHETRAN、VIC 等,土地利用/覆被变化对暴雨—径流及洪水动态影响的模型 LIS-FLOOD、IPHIV、MHYDAS 等。而 GIS 和 RS 在 LUCC 和水文循环领域的应用为水文模拟提供了新的研究思路和技术方法,如 SWAT、DPHM-RS 等。

3. LUCC 的土壤侵蚀效应研究

LUCC 引起的主要环境效应之一,是自然和人为因素双重作用的结果。不合理的土地利用和地表植被覆盖的减少对增加流域土壤侵蚀具有放大效应。土地利用/覆盖变化与土壤侵蚀之间的关系研究已逐渐成为 LUCC 研究和土壤侵蚀研究的一项新的重要课题。

在相同类型的土地上采用的土地利用方式不同,土壤侵蚀形式、强度也不同,有的差异还很大。在不同的土地利用方式下由于影响土壤侵蚀的坡长、坡度、地表覆盖、经营方式等因子不同,因此,产生的土壤侵蚀量也不尽相同。建立土地利用方式及其变化与土壤侵蚀的关系模型,是开展此研究的一种重要手段,也是通常进行研究的主要方法。到目前为止,涉及土地利用方式的土壤侵蚀模型很多,通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 及其修正版 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 是目前世界上使用最多、最常用的模型,应用此方程的关键在于各因子参数的本地化及各因子的量化精度。由于 USLE 预报坡耕地的溅蚀、片蚀和细沟侵蚀较精确,但地域性强,可移植性差,因此在应用 USLE 模型时,需要对不同的土地利用方式需要做大量的试验研究。因此,许多国内外学者在广泛应用 USLE 的同时,对模型的算法、各因子取值都做了相应的改进。孙立达(1995)等通过对不同土地利用方式下 USLE 中各因子取值的修正,计算分析了宁夏西吉县黄家二岔流域的土壤侵蚀情况,分析结果表明,流域内土地利用方式不同,其土壤侵蚀量有显著差异:坡耕地的土壤侵蚀模数为 $6885\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,若退耕种草,侵蚀模数为 $111\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,可减少 98.6%;若退耕造林,侵蚀模数为 $25\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,可减少 99.7%;若坡耕地修成水平梯田,侵蚀模数为 $34\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,可减少 99.5%。在 USLE 的土壤侵蚀因子中,地表覆盖状况对侵蚀量的影响最大。

1.1.3 流域泥沙来源研究

小流域是水土流失从坡面至沟道发生发展的基本单元。小流域一般都是以现代沟缘线为界分为沟间地和沟谷地两大区,沟间地坡度一般小于 25° ,沟谷地突变,形成大于 35° 的沟坡。由于黄土高原特殊的地貌条件,决定了黄土高原土壤侵蚀形式具有垂直分带性特征,土壤侵蚀形式依次为溅蚀片蚀带、细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带等。其中坡沟侵蚀产沙关系以及坡面侵蚀产沙分配等一直是国内外学者研究的热点和难点问题,也是争论较多的问题,它涉及侵蚀泥沙的来源,坡沟治理的方针以及水土保持措施配置等研究课题。

黄土高原丘陵沟壑区,从分水岭到坡脚线,径流入渗规律、侵蚀产沙强度、侵蚀方式及水沙运移特征表现出明显的垂直分带性规律。陈永宗(1988)分析了降雨、坡度、坡长对坡面侵蚀的影响,描述了黄土丘陵地区各种地貌形态与坡面径流侵蚀的关系,在定性描述和定量分析坡面侵蚀过程的基础上,进行了坡面侵蚀分带性研究,对于深入认识坡面侵蚀规律和坡面发育理论有重要意义。不同地形部位的野外径流小区观测表明坡上方来水来沙对坡下方侵蚀带产生重要影响(陈浩,2001)。黄土高原坡沟侵蚀产沙关系的研究,在定性和定量研究方面,皆取得了一定的发展。早在 20 世纪 60 年代,蒋德麒等(1990)就不同地貌区不同侵蚀亚带的产沙规律做了研究,探讨了沟间地和沟谷地的产沙比例问题,表明黄土丘陵沟壑区第一副区沟谷地产沙量占流域产沙总量的 52.9%~69.8%。80 年代,刘宝元等(1988)根据野外考察,对黄土丘陵沟壑区侵蚀垂直分带也进行了划分。所有这些研究成果,大大深化了人们对黄土高原侵蚀环境及其侵蚀区域分异规律的认识,清楚地展示了土壤侵蚀方式和侵蚀形态空间垂直分异的基本格局,为从定量和动力学角度研究土壤侵蚀规律奠定了重要基础。杨华(2001)对黄土区土壤侵蚀最为严重的切沟进行研究,通过实地调查及定位观测,分析得出黄土沟道泥沙主要来自切沟,采用聚类分析方法对切