

西北旱区生态水利学术著作丛书

小流域淤地坝坝系防洪风险 评价技术

李占斌 等著



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

小流域淤地坝坝系防洪风险 评价技术

李占斌 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以黄土高原淤地坝坝系为研究对象,通过实地勘察、资料收集和实验测试分析,运用多学科理论及“3S”技术和数值模拟技术,以小流域淤地坝坝系防洪风险评价为研究核心,系统分析不同坝级、不同级联方式(串联、并联和混联)淤地坝蓄水拦沙作用与淤地减蚀机制,辨析小流域坝系与沟道单元坝系分片、分层对洪水泥沙的控制关系,阐明小流域淤地坝坝系防洪拦沙能力的级联效应,研究提高小流域淤地坝坝系防洪能力的坝系布局与坝级配置方法,建立小流域淤地坝坝系防洪风险评价指标体系,并以典型小流域为例,进行坝系防洪风险评价,提出在变化形势下考虑流域坝系防洪安全的适宜建设规模。

本书可供水土保持、雨洪侵蚀、水资源系统工程、生态水文与环境经济、水资源保护与利用等领域的科研工作者和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

小流域淤地坝坝系防洪风险评价技术/李占斌等著. —北京:科学出版社, 2018.8

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-055315-7

I. ①小… II. ①李… III. ①小流域-坝地-防洪-风险评价 IV. ①TV871.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 280338 号

责任编辑: 祝 洁 杨 丹 白 丹 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 27 1/4

字数: 540 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴铸 柴军瑞 黄 强

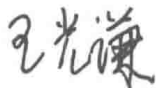
总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖库为主的淡水生态系统。这个占据着少于 1% 地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的 0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发建设与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此生态水利工程的概念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是对重点实验室研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士



2016 年 9 月

总 序 二

近 50 年来全球气候变化及人类活动的加剧，影响了水循环诸要素的时空分布特征，增加了极端水文事件发生的概率，引发了一系列社会-环境-生态问题，如洪涝、干旱灾害频繁，水土流失加剧，生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重，干旱缺水（水少）、洪涝灾害（水多）、水环境恶化（水脏）等严重影响着西部地区的区域发展，制约着西部地区作为“一带一路”桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行，开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究，揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理，提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施，发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系，确保区域生态系统健康及生态安全，既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题，又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求，同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下，作为我国西部地区水利学科的重要科研基地，西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势，汇集近年来主要研究成果，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与应用工程实际，对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用，对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时，保护好生态环境，是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科，相关研究尚处于起步阶段，期望以此丛书的出版为契机，促使更多的年轻学者发挥其聪明才智，为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016 年 9 月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20 世纪 80 年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地（西安理工大学）从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及旱区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士

2016 年 9 月

序

黄土高原是我国水土保持与生态建设的重点区域。针对水土流失与干旱缺水两大主要生态问题,我国先后在黄土高原实施了水土保持生态工程、淤地坝工程、黄土高原水土保持世行贷款项目等一批重点工程建设,同时加大了封育的力度,依靠生态自我修复能力恢复植被、改善生态,取得了巨大的成效。

淤地坝有效地解决了黄土高原水土流失严重和干旱缺水两大问题,有机地统一了生态环境建设与当地群众致富的关系,具有显著的生态效益、经济效益和社会效益,同时在治理水土流失、减少入黄泥沙、发展区域经济和改善生态环境等方面具有不可替代的作用。

20世纪50年代以来,众多水土保持科技工作者在淤地坝优化布局、坝系相对稳定、淤地坝减水减沙效益等方面开展了大量的研究工作,但是在淤地坝坝系运行安全和防洪风险评价等方面仍有不少理论问题亟待解决,特别是在淤地坝坝系蓄洪拦沙的级联调控作用机理、坝系安全稳定布局与坝级配置及坝系防洪风险评价等方面研究的不足制约了淤地坝工程建设的发展。

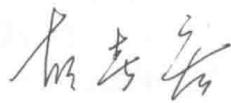
该书以黄土高原水土保持生态建设工程中的重点内容——淤地坝坝系为研究对象,通过实地勘察、资料收集和实验测试分析,运用多学科理论及“3S”技术和数值模拟技术,以小流域淤地坝坝系防洪风险评价为研究核心,在系统分析了不同坝级、不同级联方式(串联、并联)淤地坝蓄水拦沙作用与滞洪、减蚀机制的基础上,辨析了小流域坝系与沟道单元坝系分片、分层对洪水泥沙的控制关系,阐明了小流域淤地坝坝系防洪拦沙能力的级联效应,建立了小流域淤地坝坝系防洪风险分析与评价方法,提出了保障小流域淤地坝坝系防洪安全的淤地坝坝系适宜发展规模,研发了提高小流域淤地坝坝系防洪能力的坝系布局与坝级配置方法,为黄土高原地区的淤地坝规划建设、安全运行和水土资源的高效利用提供了科学依据。

与以往的研究相比,该书在以下4个方面取得了明显的创新进展:①通过辨析小流域坝系与沟道单元坝系分片、分层对洪水泥沙的控制关系,阐明了小流域淤地坝坝系防洪拦沙能力级联效应;②系统揭示了淤地坝坝系的减蚀机理;③提出了基于防洪安全与高效可持续拦沙的小流域坝系总体结构和沟道单元坝系结构的配置,以及淤地坝坝系的坝级配置比例;④建立了淤地坝坝系防洪安全风险评价指标方法,提出了保障不同尺度小流域坝系的防洪能力与防洪安全的淤地坝适宜发展规模。

该书涉及土壤侵蚀与水土保持、流域泥沙、水利工程和生态学等诸多领域,是

近年来关于淤地坝研究少见的力作，在理论上有所创新、实践上有所发展。该书的出版将对黄土高原地区土壤侵蚀与水土保持、流域泥沙、旱区水土资源开发利用、区域生态安全保障和生态文明建设产生积极作用。

该书内容翔实、数据准确、图文并茂，可供地学、农学、土壤学、水土保持与荒漠化防治、流域泥沙动力学、水利工程等专业的科技人员及高校师生参考。我相信，该书的出版将有力推动黄土高原淤地坝规划、设计、建设和运行管理的发展，并进一步提高黄土高原水土保持生态环境建设水平。



2018年6月

前 言

淤地坝是以拦沙淤泥为目的而修建的水土保持坝工建筑物。因用于淤地生产，淤地坝往往也叫生产坝，其拦截泥沙淤地而成的平地叫坝地。淤地坝作为黄土高原地区主要水土保持沟道工程措施，利用水土流失的自然过程，集大面积的水、沙、肥在小块坝地使用，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入黄泥沙，减少河道淤积，有机地统一了当地致富和治河的关系，受到了各方面的高度重视。

淤地坝是流域综合治理体系中的一道防线，通过“拦、蓄、淤”，既能将洪水、泥沙就地拦蓄，有效防止水土流失，又能形成坝地，使水土资源得到充分利用。淤地坝拦淤泥沙后，抬高了侵蚀基准点，阻止了沟底下切，使沟道比降变缓，延缓了沟道溯源侵蚀和沟岸扩张，对减轻滑坡、崩塌、泻溜等重力侵蚀和稳固沟床具有重要意义。淤地坝有效地解决了黄土高原水土流失严重和干旱缺水两大问题，使生态环境建设与当地群众致富的关系得到了有机统一，具有显著的生态效益、经济效益和社会效益，在治理水土流失、减少入黄泥沙、发展区域经济、提高群众生活水平和改善生态环境等方面具有不可替代的作用。

20 世纪 50 年代以来，淤地坝建设几经大起大落的根本原因在于淤地坝频繁水毁事件的发生。经过 60 多年的实践，淤地坝建设经历了由分散、没有规模到以小流域为单元的坝系建设，由缺乏规划、设计到不断完善前期工作的规范化建设。随着淤地坝建设的发展，广大科技工作者在淤地坝优化布局、坝系相对稳定、淤地坝减水减沙效益等方面做了大量研究，但是在淤地坝坝系运行安全及防洪风险评价等方面仍有许多理论问题亟待解决，尚未形成完整的理论体系，特别是在淤地坝坝系蓄洪拦沙的级联调控作用、坝系安全稳定布局与坝级配置及坝系防洪风险评价等方面远不能满足区域生态工程建设和经济社会发展的需求。在实践中，由于淤地坝自身特性、管理不当及超标准暴雨发生等，淤地坝水损事件经常发生。1994 年 7~8 月陕北地区 7347 座淤地坝遭到不同程度的水毁和破坏，成为 1949 年以来受害面积最大、数量最多、损坏最严重的一次溃坝事件；2012 年和 2013 年陕北地区连续强降雨产生的超标准洪水对当地淤地坝的安全运行造成了极大威胁。

2010 年 12 月 30 日，国家发展和改革委员会、水利部、农业部、国家林业局等单位联合发布了《关于印发〈黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030 年)〉的通知》，提出坚持以小流域为单元进行坝系建设，未来 20 年黄土高原规划建设淤

地坝 56 161 座, 其中, 骨干坝 10 223 座、中小型坝 45 938 座。2011 年 3 月 1 日修订的《中华人民共和国水土保持法》中明确规定, “国家加强水土流失重点预防区和重点治理区的坡耕地改梯田、淤地坝等水土保持重点工程建设”, 将淤地坝作为水土流失治理的主要措施之一。

随着黄土高原淤地坝坝系建设步伐的不断加快, 解决淤地坝坝系防洪安全问题成为黄土高原地区坝系建设成败的关键。本书针对黄土高原淤地坝工程建设中亟待解决的防洪安全与风险评价等关键问题, 系统、深入研究了淤地坝减蚀机理、坝系蓄洪拦沙作用及其级联调控效应, 提出了淤地坝坝系安全稳定的合理布局与坝级配置方案, 构建了坝系防洪风险评价方法, 对维系黄土高原地区生态安全与资源安全, 以及实现区域水土流失综合治理与社会经济协调发展具有重要意义。

本书是在水利部公益性行业科研专项“小流域淤地坝坝系防洪风险评价技术”(201201084)支持下完成的。中国科学院水利部水土保持研究所、黄河水利科学研究院、黄河上中游管理局和西安理工大学等单位的研究人员参与了相关的研究工作。中国科学院水利部水土保持研究所的杨明义研究员和张凤宝副研究员, 黄河水利科学研究院的史学建教高、耿晓东副教授、孙维营高工、李莉高工, 黄河上中游管理局的喻权刚教高、马安利高工、王答相教高主持并完成了相关课题的研究与报告总结工作。作者所在研究团队老师李鹏、鲁克新、朱冰冰、于坤霞、高海东、任宗萍及其指导的博士和硕士研究生赵宾华、惠波、王丹、袁水龙、汤珊珊、刘晓君、张泽宇、靳宇蓉等参与了全书的撰写、资料收集、文稿整理和校对等工作, 借此机会向为本书作出贡献和付出辛勤劳动的撰写组成员表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中疏漏之处在所难免, 敬请同行专家与广大读者批评指正, 以利于今后进一步完善。

作 者

2017 年 3 月

目 录

总序一	
总序二	
总序三	
序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 小流域坝系研究进展	2
1.2.2 淤地坝溃坝与风险评价研究进展	12
1.2.3 存在的问题与研究展望	13
第 2 章 研究区概况及基本资料	15
2.1 黄土高原监测坝系概况	15
2.1.1 小流域自然地理、社会经济概况	15
2.1.2 小流域水土流失及其综合治理现状	17
2.2 重点研究小流域	19
2.3 重点典型研究小流域——王茂沟小流域	21
2.3.1 自然地理概况	21
2.3.2 社会经济概况	23
2.4 数据来源	24
第 3 章 黄土高原小流域坝系形成与发展演变	25
3.1 黄土高原坝系建设历史沿革	25
3.2 1949 年后淤地坝的建设与发展	28
3.3 新时期淤地坝建设特点	32
3.4 黄土高原地区淤地坝建设成就	36
3.4.1 黄土高原地区淤地坝建设现状	36
3.4.2 黄土高原地区坝系建设现状	37
3.5 典型小流域坝系演变及历程	38
3.5.1 韭园沟小流域	38
3.5.2 王茂沟小流域	40
3.5.3 西黑岱小流域	42

3.6	黄土高原地区小流域坝系安全稳定的制约因素	42
第4章	淤地坝淤积信息提取与减蚀作用机理研究	47
4.1	淤地坝剖面泥沙沉积旋回的划分及土样采集	47
4.1.1	典型淤地坝的选取	47
4.1.2	泥沙沉积旋回层划分及土样采集	48
4.2	典型淤地坝坝地泥沙淤积信息的动态变化	50
4.2.1	淤积泥沙干容重变化特征	50
4.2.2	关地沟4#淤地坝坝地次降雨沉积旋回淤积量计算	51
4.2.3	坝地剖面泥沙沉积旋回层 ^{137}Cs 含量分布特征	51
4.2.4	坝地剖面泥沙沉积旋回层的 ^{210}Pb 含量分布特征	52
4.2.5	坝地剖面泥沙沉积旋回层的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量分布特征	53
4.3	淤地坝泥沙沉积旋回与侵蚀性降雨的响应关系	54
4.3.1	侵蚀性降雨特性与降雨资料的分析	54
4.3.2	淤地坝泥沙沉积旋回与侵蚀性降雨的对应原则	56
4.3.3	淤地坝垂直剖面中 ^{137}Cs 含量与沉积计年的关系	57
4.3.4	淤地坝坝地泥沙沉积旋回与次降雨事件的对应	57
4.4	淤地坝对沟道侵蚀的减蚀作用分析	59
4.4.1	流域不同土地利用类型坡面侵蚀产沙规律分析	59
4.4.2	流域土地利用变化分析	62
4.4.3	典型降雨事件下流域主要泥沙来源地的产沙变化	63
4.4.4	降雨侵蚀产沙与坝地淤积泥沙对比分析	64
4.5	淤地坝淤积过程对沟坡稳定性影响的研究	66
4.5.1	数字高程模型与滑坡、崩塌调查	66
4.5.2	SINMAP 模型原理	67
4.5.3	模型的集成方法	69
4.5.4	模型参数化及参数测定	69
4.5.5	坝地淤积高度对斜坡稳定性指数的影响分析	70
4.5.6	坡度对斜坡稳定性的影响	71
4.6	淤地坝对流域径流过程的影响研究	71
4.6.1	淤地坝对径流系数和输沙模数的影响	71
4.6.2	淤地坝建设对流域洪水滞时的影响	72
4.6.3	淤地坝对流域径流过程的影响机理分析	73
第5章	基于 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪的流域侵蚀产沙演变	76
5.1	野外调查取样及土样测试与分析	76
5.1.1	不同土地利用方式土壤核素含量的分异特征	76
5.1.2	不同地貌部位土壤核素含量的分异特征	77
5.2	关地沟4#淤地坝坝控流域土壤侵蚀产沙分布特征	78
5.2.1	研究区背景值的确定	78

5.2.2	不同土地利用方式土壤侵蚀特征	78
5.2.3	小流域不同地貌部位土壤侵蚀特征	79
5.3	小流域侵蚀产沙来源示踪	80
5.3.1	小流域泥沙来源研究方法	81
5.3.2	小流域泥沙来源分析	82
5.4	基于复合指纹识别法的流域泥沙来源反演	84
5.4.1	沉积旋回时间序列建立	84
5.4.2	流域侵蚀历史演变过程	85
5.4.3	淤地坝坝控流域泥沙来源反演结果	86
5.5	不同淤积阶段坝控流域侵蚀产沙强度变化	87
5.5.1	关地沟小流域侵蚀沉积速率变化趋势	87
5.5.2	关地沟 4#淤地坝坝控流域侵蚀产沙变化趋势	88
第 6 章	典型小流域坝系级联物理模式解析	90
6.1	典型小流域坝系对比的可行性分析	90
6.1.1	典型小流域气候水文条件对比	90
6.1.2	典型小流域坝系沟道地貌特征对比	90
6.2	小流域坝系级联物理模式类型	93
6.3	榆林沟小流域坝系级联物理模式解析	95
6.3.1	榆林沟小流域坝系单元总体结构	96
6.3.2	榆林沟小流域坝系单元级联控制关系解析	101
6.4	小河沟小流域坝系级联物理模式解析	103
6.4.1	小河沟小流域坝系单元总体结构	104
6.4.2	小河沟小流域坝系单元蓄洪拦沙级联控制关系解析	106
6.5	韭园沟小流域坝系级联物理模式解析	109
6.5.1	韭园沟小流域坝系单元总体结构	109
6.5.2	韭园沟小流域坝系单元蓄洪拦沙级联控制关系解析	115
第 7 章	典型小流域坝系级联配置模式与级联调控作用评价	120
7.1	典型小流域坝系不同级别沟道分布情况	120
7.1.1	榆林沟小流域	120
7.1.2	小河沟小流域	121
7.1.3	韭园沟小流域	122
7.2	典型小流域沟道工程空间分布特征与拦沙关系	123
7.2.1	典型小流域不同级别沟道淤地坝库容分布	123
7.2.2	典型小流域坝系工程特征分布情况分析	125
7.2.3	典型小流域坝系单元拦沙关系分析	127
7.3	榆林沟小流域坝系空间布局与蓄洪拦沙的级联调控关系	129
7.3.1	小流域坝系沟道分布的级联调控作用评价	129
7.3.2	榆林沟小流域不同级别沟道坝地淤积及利用情况	130
7.3.3	榆林沟小流域坝系框架布局的级联调控作用	131

7.3.4	榆林沟小流域坝系现状防洪能力分析	133
7.3.5	榆林沟小流域坝系对洪水的级联拦蓄作用评价	135
7.3.6	小流域坝系运行中存在的问题分析	138
7.4	韭园沟小流域次暴雨坝系级联作用分析	139
7.4.1	韭园沟小流域坝系现状防洪能力分析	139
7.4.2	韭园沟小流域“7·15”暴雨淤地坝水毁和泥沙拦蓄调查	141
第8章	淤地坝对流域泥沙输移-沉积特征的影响	145
8.1	材料和方法	145
8.1.1	土壤样品的采集	145
8.1.2	土壤分形理论	145
8.2	坝地泥沙淤积对沟道地形的影响	146
8.3	坝地淤积泥沙的粒径分析	147
8.3.1	坝地土壤粒径的统计特征	147
8.3.2	坝地淤积泥沙质地分类	148
8.3.3	坝地土壤颗粒的粗化度	148
8.4	坝地土壤颗粒分形特征	151
8.4.1	坝地土壤颗粒体积分形维数的分布特征	151
8.4.2	坝地土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成的关系	152
8.5	典型暴雨下淤地坝淤积泥沙特征	153
8.5.1	绥德“7·15”暴雨洪水调查	153
8.5.2	次暴雨洪水坝地淤积特征	153
8.6	土壤颗粒体积分形维数与土壤性质的关系	155
8.7	不同类型单座淤地坝坝地泥沙淤积特征	156
8.7.1	有放水建筑物的淤地坝坝地泥沙淤积特征	156
8.7.2	有溢洪道的淤地坝坝地泥沙淤积特征	157
8.7.3	“闷葫芦”坝坝地泥沙淤积特征	157
8.8	坝系单元坝地泥沙淤积特征	158
8.8.1	不同坝系单元级联模式下的坝地泥沙淤积特征	158
8.8.2	不同沟道级别下的坝地泥沙淤积特征	158
8.8.3	不同坝系单元下的坝地泥沙淤积特征	159
8.9	王茂沟坝系坝地泥沙淤积特征	161
第9章	小流域淤地坝系级联效应模拟与分析	162
9.1	坝系运算关系解析	162
9.2	坝系防洪标准研究	163
9.2.1	子坝系和单元坝系的概念	163
9.2.2	单元控制论的应用	165
9.3	坝系拦蓄洪水的级联作用	167
9.3.1	小流域坝系防洪体系	168
9.3.2	淤地坝防洪标准	168

9.3.3	单坝防洪标准与坝系防洪标准的关系	169
9.3.4	王茂沟小流域不同坝系结构配置的蓄洪效应	169
9.4	坝系防洪安全控制方法	177
9.5	王茂沟小流域不同坝系结构组合拦沙级联效应	179
9.6	小流域坝系不同结构配置的相对稳定分析	184
9.6.1	单坝相对稳定与坝系稳定的关系	184
9.6.2	坝系相对稳定与骨干坝的关系	185
第 10 章	淤地坝(系)安全稳定影响因素分析	191
10.1	淤地坝安全影响因素分析	191
10.1.1	淤地坝排水排沙能力分析	191
10.1.2	淤地坝拦水拦沙能力分析	192
10.1.3	坝控流域的来水来沙状况分析	192
10.2	淤地坝及坝系相对稳定系数	196
10.2.1	坝系相对稳定的内涵	196
10.2.2	流域淤地坝与坝系相对稳定系数的空间变化特征	197
10.3	小流域坝系不同地貌单元的水动力结构功能变化	201
10.3.1	暴雨洪水集中是侵蚀产沙的主要动力	202
10.3.2	高强度暴雨下的超渗产流对大洪峰形成具有重要影响	203
10.3.3	产沙强烈、粗泥沙集中是暴雨洪水产沙的显著特点	205
10.4	不同地貌单元淤地坝建设耦合性分析	206
10.4.1	黄土区	206
10.4.2	砭砂岩区	214
10.4.3	盖沙区	220
10.5	不同地貌单元水土资源优化调控模式探讨	221
10.5.1	黄土区	221
10.5.2	砭砂岩区	222
10.5.3	盖沙区	223
第 11 章	坝系安全稳定布局与坝级配置及其综合效益研究	225
11.1	小流域坝系布坝密度研究	225
11.1.1	布坝密度影响因素分析	225
11.1.2	黄土高原不同分区小流域坝系布坝密度	226
11.2	坝系空间布局的配置比例分析	230
11.3	骨干坝最优控制面积分析	231
11.4	淤地坝相对稳定系数分析	232
11.5	淤地坝系建坝时序研究	233
11.5.1	流域坝系的建坝顺序	233
11.5.2	小流域坝系的建坝时序分析	237
11.6	小流域坝系综合效益的研究	239
11.6.1	坝系拦沙蓄水效益分析	240

11.6.2	坝地利用及增产效益分析	243
11.6.3	生态效益	247
11.6.4	社会效益	247
第 12 章	黄土高原淤地坝水损特征及原因分析	249
12.1	黄土高原小流域坝系示范工程安全运行监测	249
12.2	典型小流域淤地坝受损调查	253
12.3	区域淤地坝安全现状	257
12.4	淤地坝溃坝形式及原因分析	259
12.4.1	典型坝系溃坝历史事件	259
12.4.2	典型坝系垮坝形式	263
12.4.3	典型坝系溃坝原因解析	264
第 13 章	淤地坝溃坝机理模拟与分析	272
13.1	竖井式泄水建筑物空蚀空化引起坝体受损机理实验研究	272
13.1.1	实验概述	272
13.1.2	水流流态	273
13.1.3	泄水建筑物放水塔壁面压强分布规律	277
13.1.4	泄水建筑物放水洞沿程水深和流速分布规律	281
13.1.5	放水隧洞沿程水流空化数分析	284
13.2	不同土地利用方式下土壤入渗率实验研究	285
13.2.1	实验设计	285
13.2.2	实验结果与分析	286
13.3	淤地坝坝系暴雨洪水计算	288
13.3.1	暴雨洪水计算方法	288
13.3.2	王茂沟小流域“7·15”特大暴雨洪水验证分析	289
13.3.3	变化条件下流域设计暴雨洪水与侵蚀产沙分析	311
13.3.4	变化条件下王茂沟小流域淤地坝溃坝模拟研究	319
13.4	淤地坝坝体渗流与安全稳定性分析	334
13.4.1	淤地坝坝体特征描述	334
13.4.2	计算原理与方法	334
13.4.3	参数选取及测定	335
13.4.4	边坡稳定性计算模型的建立	335
13.4.5	数值模拟计算	336
13.5	淤地坝溃坝模拟	341
13.6	淤地坝溃决计算	345
第 14 章	淤地坝防洪风险评价指标体系与评价	347
14.1	淤地坝防洪风险评价指标体系构成及确定	347
14.1.1	评价指标体系的确定	347
14.1.2	评价指标计算及标准化	347
14.1.3	淤地坝防洪风险评价指标权重	350