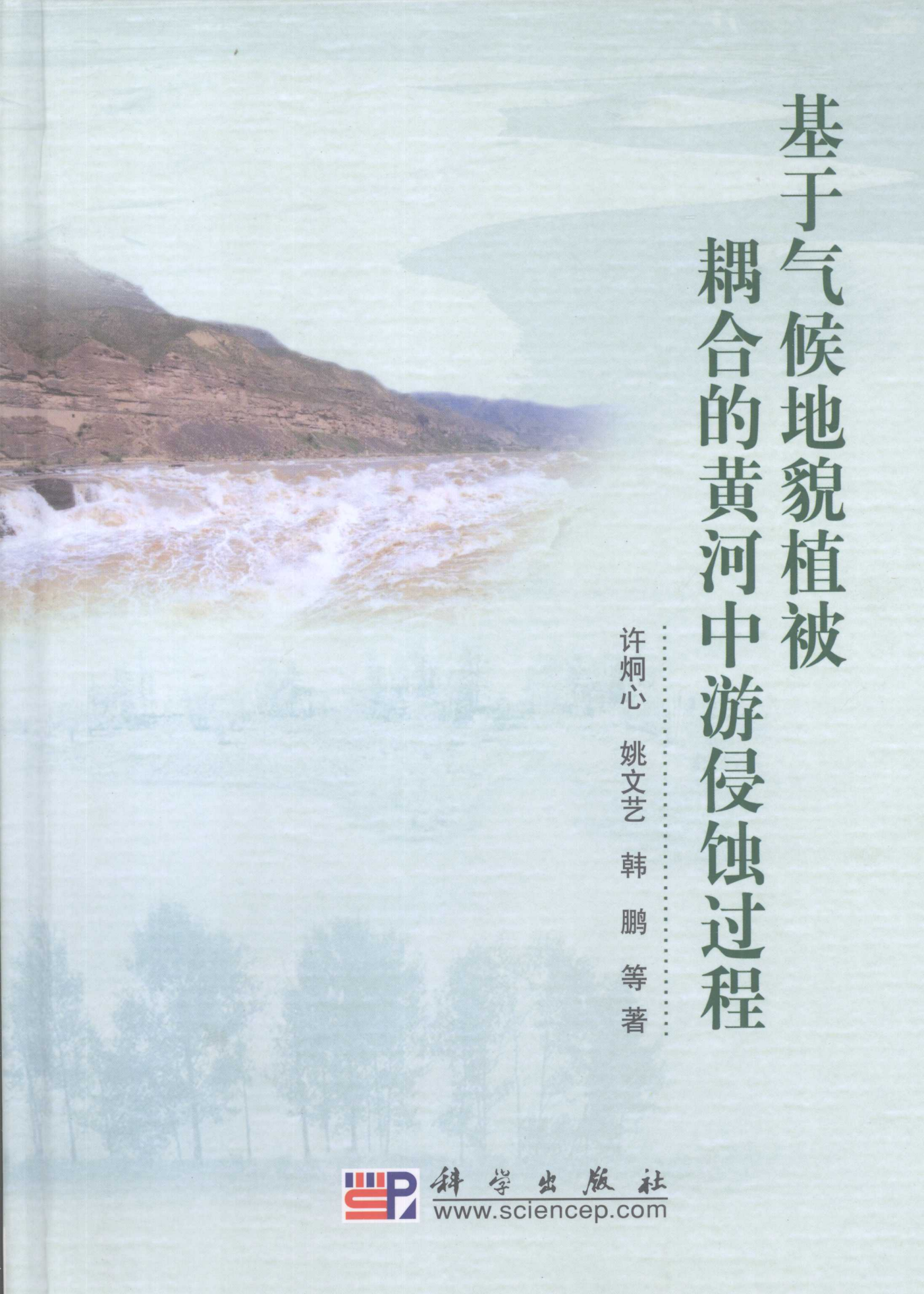


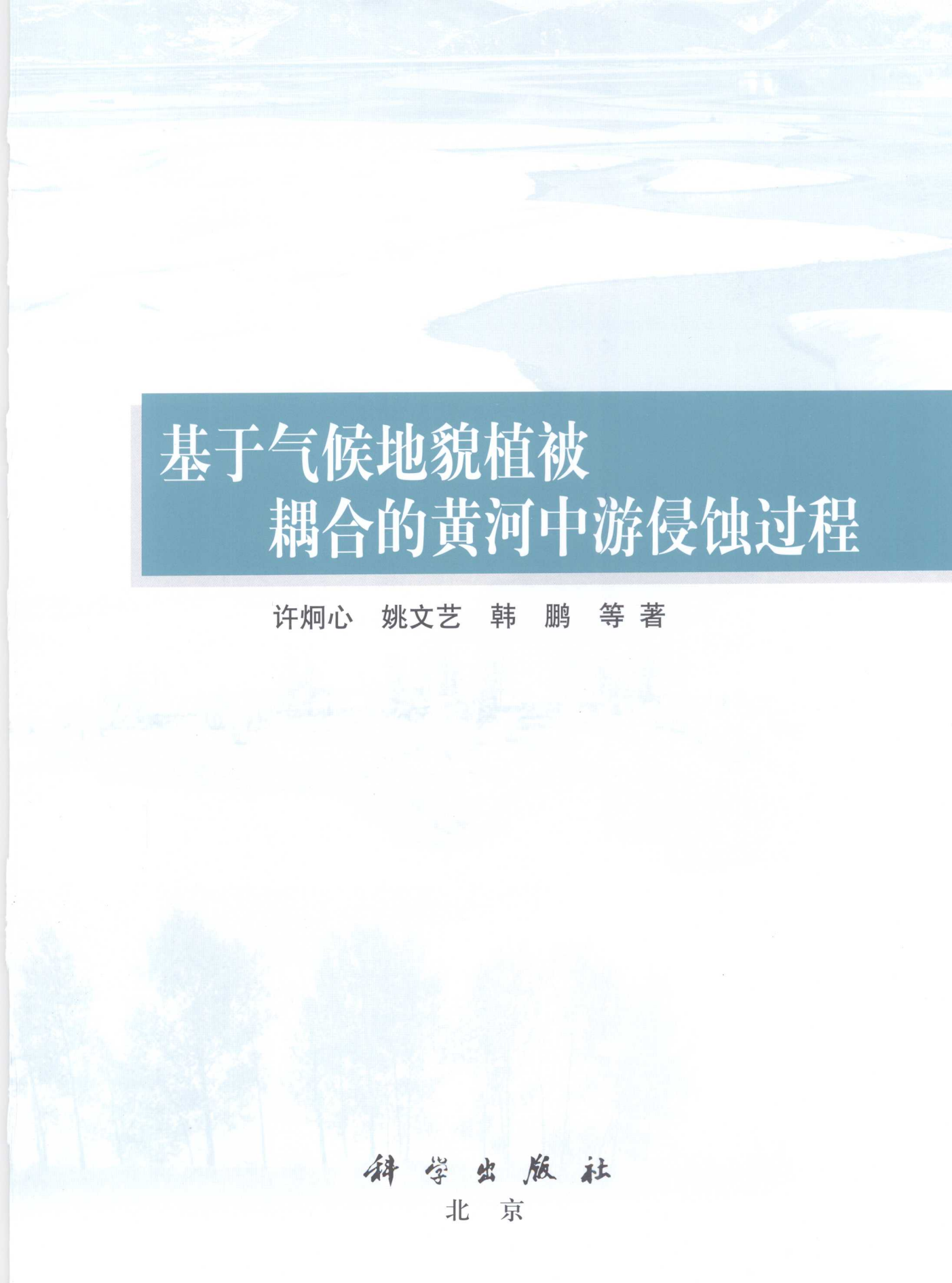


基于气候地貌植被 耦合的黄河中游侵蚀过程

·····
许炯心 姚文艺 韩鹏 等著
·····



科学出版社
www.sciencep.com



基于气候地貌植被 耦合的黄河中游侵蚀过程

许炯心 姚文艺 韩 鹏 等 著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是以作者承担的国家自然科学基金委员会和黄河水利委员会黄河联合研究基金重点项目“基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程”所取得的主要成果为基础撰写的。全书系统地阐述了黄河中游流域宏观尺度上的气候-植被-侵蚀相互作用、坡面与沟道挟沙水流与植被的相互作用、坡面-沟道耦合关系及其侵蚀产沙效应、水土保持措施优化配置模式、水保措施的减沙效应及其临界现象、侵蚀产沙及水土保持减沙的空间尺度效应与时间过程规律等。

本书可供地貌、自然地理、地质、生态、水利和水土保持、环境保护等专业的科学研究人员、工程技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程 / 许炯心等著. —北京: 科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-022479-8

I. 基… II. 许… III. 黄河-中游河段-土壤侵蚀-研究 IV. S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 101600 号

责任编辑:李 敏 王 倩 李久进 / 责任校对:张 琪

责任印制:钱玉芬 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

前 言

黄河中游,特别是位于中游河口至龙门间的多沙粗沙区的侵蚀产沙问题,既是我国地球科学领域中的一个具有重大科学意义的问题,又与国家治理黄河的重大战略决策密切相关。自从20世纪50年代以来,我国科学工作者在这一领域中进行了世代相继的不懈努力,取得了若干重要进展。然而由于问题的复杂性,对于这一地区高强度侵蚀产沙形成机理的解释仍有待于深化。黄河中游多沙粗沙区是我国也是世界上最著名的侵蚀产沙高值区,尤其是在大尺度范围内,为全世界的最高值,引起了国际地貌研究界的关注,需要我们从理论上给出令人信服的解释。在黄土高原水土流失治理方面,近40年来取得了巨大的进展,进入黄河的泥沙量显著减少了。但是值得注意的是,黄河水沙变化研究基金二期研究成果计算显示,1950~1996年各项减沙措施的总减沙量中,淤地坝拦沙占72%,林草措施仅占20%。这说明植被措施的减蚀减沙量十分有限,其减沙效果大大滞后于其他措施。因此,必须深入研究坝系、植被等典型水土保持措施的蓄水减蚀作用及其机理,提出不同沟坡类型上水保措施的优化配置模式,为黄河中游多沙粗沙区的水土流失治理提供比较坚实的理论依据。

把国内流域侵蚀产沙研究中需要突破的薄弱环节和目前国际前沿中的生长点有机地结合起来,可以形成基于气候-植被-地貌耦合关系的侵蚀产沙过程的新概念、新思路。一定地域(如坡面、沟道或河道流域)内的气候、植被、土壤、地貌诸要素互相耦合,可以形成特定的地生态系统(geo-ecosystem),而水土流失体现为该系统中的物质迁移。气候决定了宏观植被的地带性,而地貌要素决定了水热要素的再分配,在生物气候地带性的背景下进一步决定了具体的植被条件。气候(降水)与地貌(地形势能)共同决定了侵蚀力,植被、土壤和作为地貌要素之一的地表物质则共同决定了抗蚀力。在侵蚀过程中,植被本身和土壤会发生变化,由此导致抗蚀力的变化,并进而反馈于侵蚀过程,使侵蚀动态发生变化,最终形成某种准平衡状态。基于生物地貌学和植被-侵蚀动力学原理,人类可以通过对植被及微地貌要素进行调控,从而将系统内的物质迁移速率控制在可以接受的范围内,即低于允许侵蚀量。显然,这为我们深化认识植被措施减蚀机理提供了理论工具。基于这一思路,我们承担了国家自然科学基金委员会和黄河水利委员会黄河联合研究基金重点项目“基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程”(项目批准号:50239080),项目研究历时4年(2002年1月至2005年12月)。项目的研究目标是:在提出基于气候-地貌-土壤-植被耦合关系的侵蚀过程研究新思路的基础上,深入研究气候-植被-侵蚀

相互作用机理, 阐明坡面-沟道-河道耦合关系及其产沙效应, 揭示坝系、草类植被等典型水土保持措施的蓄水减蚀作用及其机理, 提出不同沟坡类型上水土保持措施优化配置模式, 为黄河中游多沙粗沙区的水土流失治理提供比较坚实的理论依据, 从而为黄河流域水土流失治理提供决策依据, 并在某些前沿理论问题上取得进展, 为学科的发展作出贡献。经过项目组全体人员的努力, 最终完成了研究任务, 实现了研究目标。本书即是以这一项目的主要研究成果为基础编写而成的。

项目是由中国科学院地理科学与资源研究所、黄河水利委员会黄河水利科学研究院和北京大学的有关科研人员共同承担的。参加本项目的人员包括: 许炯心、师长兴、陈浩、王随继、陆中臣、闫云霞、杨吉山、廖建华、信忠保、梁广林、薄俊丽 (以上为中国科学院地理科学与资源研究所和中国科学院生态环境研究中心人员), 姚文艺、史学建、李勉、肖培青、康玲玲 (以上为黄河水利科学研究院人员), 韩鹏、肖庆文、钟定胜、李小娟 (以上为北京大学人员), 周金星、王德祥、张华、孙浩远、任海宝 (以上为中国林业科学研究院人员)。同时, 还有不少其他同志为项目的完成作出了贡献 (恕不一一列举)。

本书是项目组全体成员团结协作、辛勤劳动的结晶。各章节的执笔人如下: 前言, 许炯心; 第一章, 许炯心; 第二章, 第一节、第三节和第四节许炯心, 第二节陆中臣; 第三章, 李勉; 第四章, 周金星、陈浩、王德祥、张华; 第五章, 姚文艺、肖培青; 第六章, 史学建; 第七章, 许炯心; 第八章, 第一节陈浩、方海燕, 第二节信忠保; 第九章, 第一节韩鹏、肖庆文, 第二节至第四节陈江南、姚文艺、康玲玲; 第十章, 韩鹏; 第十一章, 第一节王随继, 第二节陈浩、方海燕; 第十二章, 第一节至第三节许炯心, 第四节师长兴; 第十三章, 第一节闫云霞, 第二节师长兴, 第三节和第四节许炯心。许炯心对全书进行了汇总和统稿。各章节的执笔编写人员已经在相关章节的标题下以脚注的方式注明。

本项目进行过程中, 得到国家自然科学基金委员会李万红教授等领导和黄河水利委员会薛松贵、陈效国、刘晓燕等领导的关怀和指导, 谨致以最诚挚的感谢。

研究工作涉及的大量资料来自有关水文站、气象站和流域管理部门, 没有这些单位的同志们数十年如一日的辛勤劳动, 作者的研究工作是无法完成的。在此, 谨向他们表示衷心感谢和最崇高的敬意。由于资料和水平的限制, 作者虽然努力使材料的组织系统化、条理化, 但尚未尽如人意。本书的不足和谬误之处若能得到读者的指正, 作者将十分感激。

作者

2008年10月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 黄河流域和不同水沙来源区概况	1
第二节 基于气候地貌植被耦合的侵蚀产沙过程的研究意义	3
第三节 任务来源、研究内容、主要研究进展与本书的结构	5
第二章 宏观尺度上的气候-植被-侵蚀相互作用研究	9
第一节 宏观尺度上气候-植被-侵蚀的相互关系	9
第二节 黄土高原治理前景分析	18
第三节 黄土高原水土保持植被配置的合理性分析	30
第四节 气候条件对黄土高原水土保持植被结构的影响及其在植被建设中的意义	39
第三章 坡面-沟道挟沙水流与植被的相互作用	44
第一节 试验设计与方法	44
第二节 植被对坡面-沟坡系统径流水力特性的影响	47
第三节 坡面草被对坡面-沟坡系统侵蚀产沙过程的影响	72
第四章 黄土高原植被演化及其与水土保持的关系	85
第一节 黄土高原不同地貌单元植被分布情况分析	85
第二节 黄土高原植被不同演替阶段的特征	89
第三节 不同植物群落演替阶段物种多样性的变化	94
第四节 黄土高原天然木本植物垂直分布格局	98
第五节 植被群落演替与水土保持因子的耦合关系研究	104
第五章 坡面-沟道耦合关系及其产沙机理	115
第一节 流域侵蚀试验模型设计与试验方案	115
第二节 坡面-沟道耦合下的流域地貌形态发育过程	119
第三节 坡面-沟道耦合的侵蚀产沙关系	126
第六章 淤地坝拦沙作用及坝系系统稳定理论	142
第一节 淤地坝系统	142
第二节 坡面治理和坝系建设的关系	144
第三节 坝系拦沙量与减蚀量之间的定量关系	145
第四节 淤地坝拦沙减蚀作用的相对平衡	151

第七章 气候地貌植被耦合对高含沙水流的影响	153
第一节 坡面-沟道耦合系统中的高含沙水流	153
第二节 高含沙水流的时间变化及其原因	165
第八章 植被恢复及其对坡面-沟道系统侵蚀产沙的影响	174
第一节 黄土高原典型小流域坡面植被恢复对沟道侵蚀的影响	174
第二节 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响	185
第九章 水土保持措施优化配置模式研究	198
第一节 基于水土保持效益的土地利用空间优化研究	198
第二节 流域水土保持治理措施配置模式与优化	210
第三节 流域土壤侵蚀治理的洪水泥沙响应过程	223
第四节 流域治理的河流系统效应	242
第十章 黄河中游流域水土保持措施减沙效益临界研究	263
第一节 数据及分析方法	264
第二节 黄河中游水土保持减沙临界效益分析	269
第十一章 侵蚀-植被相互作用过程中的临界现象	280
第一节 黄河中游多沙粗沙区侵蚀产沙与植被相互作用的临界现象	280
第二节 流域产沙中的地理环境要素临界	287
第十二章 水土保持减沙效应	296
第一节 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因	296
第二节 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响	303
第三节 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应	310
第四节 无定河坡面措施减沙和拦粗泥沙量分析	320
第十三章 侵蚀产沙及水土保持减沙的空间尺度效应与时间过程规律	327
第一节 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究与产沙模数图编制	327
第二节 黄土高原水土保持减沙效益的尺度效应分析	338
第三节 无定河水土保持措施减沙效益的时间变化与临界现象	342
第四节 无定河淤地坝拦沙措施时间变化的分析与对策	350
参考文献	358

第一章 绪 论^{*}

第一节 黄河流域和不同水沙来源区概况

黄河为我国第二大河，发源于青海省青藏高原巴颜喀拉山北麓海拔 4500m 的约古宗列盆地，在山东省垦利县注入渤海，干流河道全长 5464km，流域面积 75.2 万 km²，另有面积为 4.2 万 km² 的内流区位于流域分水线以内（赵文林，1996）。黄河流域地形复杂。在地貌上从西到东跨越我国地貌的三大阶梯，包括青藏高原东北部、黄土高原、太行山区和华北平原等地貌单元。在自然地理上则包括半湿润、半干旱带、干旱带等，表现出鲜明的过渡性质，是中国和世界上著名的脆弱生态带之一。区内各地年平均气温在 -4 ~ 10℃，年蒸发量 1000 ~ 3000mm。黄河流域多年平均降水 466mm，降水量的地区差异很大，年内分配集中，年际变化较大。

流域系统是一个多层次的等级系统，可以划分为不同的子系统。黄河流域地域广阔，自然带丰富多样，因而它的上中游产水产沙子系统还可以依地域不同而划分为若干次一级子系统。这些子系统代表了不同自然因子的特定组合，决定着特定的产流产沙过程，可以与不同的水沙来源区相对应。钱宁等曾将黄河上中游划分为两个多沙区和两个少沙区。河口至龙门间支流加上北洛河及泾河支流马连河而构成了多沙粗沙区，渭河、泾河（除马连河外）和汾河构成了多沙细沙区。河口镇以上流域构成一个少沙区，伊洛河和沁河构成另一个少沙区。此外，渭河南岸（即秦岭北坡）支流也构成一个少沙清水区（钱宁等，1980）。从自然地理角度而言，上述各区的形成正是自然地理条件区域分异的产物（许炯心，1997）。兹分述如下。

（一）河口镇以上少沙区

从自然地理上说，本区实际上是由两个不同的自然地理单元构成的，即河口镇至兰州区间和兰州以上流域。河口镇至兰州区间属中温带半干旱区与干旱区，为温带荒漠草原，地表组成物质为洪积冲积物、风成沙、基岩，黄土分布不广，年降水量 200 ~ 400mm，水蚀作用不强，部分地区为风力 - 水力侵蚀，产流模数较低，产沙模数也不高，但在风力作用下进入黄河的粗泥沙不容忽视。

兰州以上流域大部分位于青藏高原高寒半湿润区，局部为高寒湿润区，植被类型为高山草甸、高山草原，局部为高山森林草甸。虽然降水量不多，但因气候寒冷，蒸发量小，

* 本章执笔人为许炯心

故河川径流比较丰沛，是黄河清水基流的主要来源。黄土仅局部分布，地表物质抗蚀性较强，故产沙量少。

（二）多沙粗沙区

本区由河口至龙门间支流（如无定河、皇甫川、窟野河等）以及北洛河与泾河支流马连河等流域构成，位于黄土高原的主体部分。属中温带和暖温带半干旱区，自然植被类型为温带干草原和暖温带森林草原。年降水量为 350 ~ 450mm，多以暴雨形式集中下落，侵蚀力较强。地表物质主要为沙黄土，粒径大于 0.05mm 的颗粒含量为 31% ~ 57%，抗蚀力很弱。故本区侵蚀强烈，进入黄河的粗泥沙数量很大。由于黄土层深厚，渗透性强，故径流深度较小，对黄河径流量的贡献相对较小。

（三）多沙细沙区

本区由渭河、泾河干支流（除马连河外）和汾河组成，位于黄土高原的东部、南部。属暖温带半旱区，部分为半湿润区。自然植被类型为暖温带森林草原，部分为暖温带落叶阔叶林。地表为黄土和黏黄土，粒径大于 0.05mm 的颗粒含量为 5% ~ 15%，故由本区进入黄河的泥沙较细，粗泥沙含量较低。年降水量为 500 ~ 600mm，产流量较上一区域为大，对黄河径流量的贡献也较大。

（四）伊洛沁河区

本区属暖温带半湿润气候，自然植被为暖温带落叶阔叶林，地表物质为黏黄土和基岩。相对而言，此区植被较好，地表抗蚀力也较强，故产沙模数不是太高，形成另一个少沙区。因年降水量较大（600 ~ 650mm），径流丰沛，对黄河干流有稀释作用，使得其汇口以下局部河段的淤积大为缓和，甚至发生冲刷。

（五）渭河南山支流区

本区由发源于秦岭北坡的诸小河组成，属暖温带半干湿润、湿润气候，降水丰沛，自然植被为落叶阔叶林，且地表物质多为基岩，抗蚀力强，故产沙模数低，为黄河中游的清水区。但因其面积不大，在黄河总径流中所占比例也小。

从各区的概述可以看出，3 个少沙清水区都位于半湿润区（高寒半湿润或暖温带半湿润），而两个多沙区都位于半干旱区。许炯心曾根据我国 700 余个流域的资料，对 Langbein - Schumm 定律（Langbein, Schumm, 1958）进行了验证，给出了我国径流深（用以代表气候）、植被类型与产沙模数的关系曲线。此关系曲线表明在半干旱气候下产沙模数最大，当降水量增多而进入半湿润、湿润气候时，因植被类型由草原变为森林，抗蚀力的增加大大超过侵蚀力增加，故产沙模数减小。在一定程度上，黄河上中游不同水沙来源区的形成也可以用这一原理解释（许炯心，1994）。

在上述各区中，多沙粗沙区在全流域的治理中具有特别重要的地位。黄河下游河道河

床冲淤与泥沙来源区产沙有着密切的联系。钱宁等(1980)的研究表明,下游河道的大量淤积主要是由来自粗泥沙来源区的物质所形成的。他们通过1952~1960年三门峡水库建库前及建库后1969~1978年的103场洪水资料分析,证明了这一点。他们将历次洪水的来源区分为以下6类:①强度较小笼罩全流域的暴雨洪水;②源自粗泥沙来源区洪峰较大而含沙量较大的洪水;③源自粗泥沙来源区降水强度中等、含沙量较大的洪水,并有少量源自低产沙区的洪水加入而形成的洪水;④源自粗、细泥沙来源区含沙量大的洪水与源自低产沙区的洪水汇合形成的洪水;⑤主要来自低产沙区的洪水;⑥来自低产沙区但含沙量大的洪水。他们分别计算了103场洪水中各类洪水带来的泥沙在黄河下游的淤积量。结果表明,属于第二类洪水的只有13场,但是,其淤积量却占103场洪水淤积总量的60%。可见,源自粗泥沙来源区的洪水对下游河道减淤最不利。许炯心基于1950~1960年三门峡水库建库前及建库后1969~1989年的年系列资料分析,建立了黄河下游年淤积量与多沙粗沙区、多沙细沙区来沙量以及河口镇以上清水区、伊洛沁河清水区来水量之间的多元回归方程。结果表明:来自多沙粗沙区的每吨泥沙,在黄河下游导致的淤积量为0.455t;而来自多沙细沙区的每吨泥沙,在黄河下游导致的淤积量仅为0.154t。由此可见,来自多沙粗沙区的每吨泥沙所导致的黄河下游河道淤积量,是来自多沙细沙区每吨泥沙所导致淤积量的3倍(许炯心,1997)。因此,要解决黄河下游河道淤积的问题,在多沙粗沙区集中力量实施水土保持措施,是十分重要的。有鉴于此,本书以多沙粗沙区为主要研究区,以期所获成果能为黄河流域的治理提供决策依据。

第二节 基于气候地貌植被耦合的侵蚀产沙过程的研究意义

黄河中游河口至龙门间的多沙粗沙区的侵蚀产沙问题与国家治理黄河的重大战略决策密切相关。黄河中游多沙粗沙区,是我国也是世界上最著名的侵蚀产沙高值区,从宏观自然地理背景上说,其成因可以用Langbein-Schumm关系来解释(Langbein et al., 1958; 许炯心, 1994)。然而用Langbein-Schumm理论对美国 and 世界上其他国家进行研究的结果表明,该关系的峰值区的产沙模数为 $300 \sim 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,而位于黄河多沙粗沙区的这一峰值竟达 $5000 \sim 6000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。正在实施的西部大开发战略,将生态环境建设放在首要地位,黄河中游多沙粗沙区水土流失的有效治理是其中的核心问题之一。自从国家在20世纪60年代将这一地区作为水土流失重点治理区以来,通过修造梯田、造林种草、修筑拦沙库和淤地坝,使来自这一地区的入黄泥沙量大幅度减少。然而,根据黄河水沙变化研究基金二期研究成果计算,在1950~1996年各项减沙措施的总减沙量中,淤地坝拦沙占72%,林草措施仅占20%。据1988~1992年国家自然科学基金重大项目成果计算,在1950~1989年各项减沙措施的总减沙量中,淤地坝拦沙占88%,林草措施仅占3.4%(徐建华等, 2000)。在西部生态环境建设中,以“退耕还林(草)、封山绿化,个体承包,以粮代赈”十六字措施作为指导方针,将植被措施放在十分重要的地位。如何提高植被措施减蚀减沙有效性,是一个亟待解决的重要问题。

纵观国内近 30 年来所取得的成果, 尽管在若干理论问题上已取得了重要进展, 如流域系统中的侵蚀、搬运、沉积过程 (陆中臣等, 1991; 尹国康, 1993) 及上中游侵蚀与下游沉积的关系 (钱宁等, 1980), 多沙粗沙区的界定 (徐建华等, 2000; 景可等, 1986), 坡耕地特别是陡坡耕地侵蚀机理的室内实验研究与野外实验研究 (陈永宗等, 1988; 景可等, 1993; 唐克丽等, 1990; 蔡强国等, 1998; 张胜利等, 1994; 刘宝元等, 1999; 周佩华, 1992), ^{137}Cs 和其他试验技术的应用 (张信宝等, 1989), 植物根系的抗蚀机理 (李勇等, 1991), 基于 GIS 和物理过程分析的侵蚀产沙模型 (汤立群, 1996) 等, 但仍然存在某些不足之处:

(1) 单一因素和作用过程的研究较多, 各种因素和过程耦合机理的研究较少, 基于气候-植被-地貌耦合关系的系统研究尚有待进行。

(2) 植被减沙效益的评价尚处于以“水保法”进行简单推算的阶段, 未涉及过程的物理学和生物学机理。

(3) 在从典型调查、典型坡面和实验小流域向面上外推时, 缺乏基于尺度效应研究的理论依据。

(4) 对水土保持措施减沙效应时空演化过程中的复杂响应现象缺乏了解。

(5) 对沟坡关系的表达尚停留在定性或经验性定量的阶段, 缺乏基于物理学定律的理论表达。

由于上述不足的存在, 现有的理论成果还不能完全回答黄河中游多沙粗沙区水土流失治理中需要解决的问题, 需要我们瞄准国际地貌学和侵蚀学领域中的前沿问题, 结合生态环境建设中的国家需求, 展开源头性的创新研究。

近 20 年来, 新概念、新理论、新方法和新技术的产生和有物理基础的模型研究的大量涌现, 大大深化了人们对侵蚀机理的认识。国际侵蚀产沙领域的研究已取得了长足的进步, 形成了若干重要生长点, 例如, ①生物地貌过程的研究大大深化了人们对植被与侵蚀之间关系的认识 (Bergkamp, 1998; Cammeraat et al., 1999; Janeau et al., 1999; Brookes et al., 2000; Nicolau et al., 1996; Parsons, 1996; Scott et al., 1996; Friedman et al., 1996), 国际地貌学权威杂志 *Geomorphology* 于 1995 年和 1996 年连续出版专辑对此加以报道; ②地貌过程中尺度效应的研究正在取得进展, 为基于小尺度研究的成果向大尺度外推提供了可能 (Jonathan, 1995; Blöschl, 1999; Heather, 2001; Seyfried, 1998; Mathier et al., 1996; Imeson et al., 1998; Niemann, Bras, 2001); ③复杂系统对环境条件变化产生非线性响应这一概念的提出, 使我们有可能深入研究水土保持减沙效应的时间过程规律 (Himalaya et al., 1998; Burlando et al., 1991; Schlunegger et al., 2002; Mather, 2000; Warner, 1995)。

把以上列举的国内流域侵蚀产沙研究中需要突破的薄弱环节和目前国际前沿中的生长点有机地结合起来, 可以形成基于气候-植被-地貌耦合关系的侵蚀产沙过程的新概念、新思路。国际上近 20 年来兴起的生物地貌学研究, 即着眼于上述耦合系统中的地貌、植被与物质迁移的相互作用, 取得了一系列重要进展 (Bergkamp, 1998; Cammeraat et al., 1999; Janeau et al., 1999; Brookes et al., 2000; Nicolau et al., 1996; Parsons, 1996; Scott

et al., 1996; Friedman et al., 1996)。基于生物地貌学和植被-侵蚀动力学原理,人类可以通过对植被及微地貌要素进行调控,从而将系统内的物质迁移速率控制在可以接受的范围内,这为我们深化对于植被措施减蚀机理的认识,提供了理论工具。

以植被恢复重建来进行水土流失治理是当前西部大开发中生态环境建设的重点。黄河水利委员会有关单位开展的生物柔性坝治理砒砂岩水土流失和陕西省水土保持局等单位开展的坡地自然封禁治理等措施,已经初步显示出成效(毕慈芬等, 1997; 毕慈芬, 2001)。对植被措施的减蚀减沙机理进行深入研究,是当前亟待开展的工作。大规模植被恢复的规划实施以后,黄土高原的减蚀减沙前景的估算,是一个关系到治黄规划决策的重要问题。黄土高原侵蚀治理的研究人员经过近 40 年的努力,在坡面侵蚀治理方面已经形成了一套比较成熟的、行之有效的技术。但是在沟道侵蚀方面,除了采用淤地坝拦沙以外,尚不能通过经济可行的措施控制重力侵蚀。对于这一问题尚需深入研究。

第三节 任务来源、研究内容、主要研究进展与本书的结构

一、任务来源

本书是基于国家自然科学基金委员会和黄河水利委员会共同资助的黄河联合研究基金重点项目“基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程”的研究成果编写的。项目的研究目标是:在提出基于气候-地貌-土壤-植被耦合关系的侵蚀过程研究新思路的基础上,深入研究气候-植被-侵蚀相互作用机理,阐明坡面-沟道-河道耦合关系及其产沙效应,揭示坝系、草类植被等典型水土保持措施的蓄水减蚀作用及其机理,提出不同沟坡类型上水土保持措施的优化配置模式,为黄河中游多沙粗沙区的水土流失治理提供比较坚实的理论依据。并通过这一研究,在某些前沿理论问题上取得进展。

二、项目的研究内容

(一) 气候-植被-侵蚀相互作用与耦合关系

(1) 宏观尺度上的气候-植被-侵蚀相互作用研究:研究宏观尺度上气候-植被-侵蚀的相互关系,并以此为基础进行黄土高原治理前景分析和黄土高原水土保持植被配置的合理性分析。

(2) 坡面与沟道挟沙水流与植被的相互作用:研究坡面草被对坡面流阻力特性及侵蚀过程的影响;沟道挟沙水流与植被的相互作用;坡面、小流域植被演替过程及其对侵蚀的影响。

(二) 坡面-沟道耦合关系及其侵蚀产沙效应

(1) 坡面-沟道耦合关系及其产沙机理:分析在不同坡面特征、不同坡面侵蚀强度和

产沙产流过程等条件下坡面、沟道侵蚀产沙之间的耦合机制,探讨可反映坡面-沟道侵蚀产沙过程之间耦合关系的数学表达。

(2) 坝系系统稳定理论的深化研究:研究淤地坝之间的相互作用,研究坡面来沙、输沙和坝系拦蓄之间复杂的响应关系,以及坝系拦沙量与减蚀量之间的定量关系;并以此为基础进一步完善坝系拦沙减蚀作用的相对平衡理论。

(3) 坡面-沟道耦合系统中高含沙水流的形成机理。

(4) 坡面植被恢复对沟道侵蚀的影响及其定量表达。

(三) 水土保持减沙效益的临界规律、尺度效应与复杂响应

(1) 水土保持措施优化配置模式研究:应用优化理论和系统控制论提出典型流域的水土保持措施配置模式。

(2) 水土保持措施减沙效益临界研究:采用统计分析方法,给出不同置信度水平下的水土保持措施减沙效益,确定可明显起到减沙作用的临界规模。

(3) 侵蚀-植被相互作用过程中的临界现象。

(4) 水土保持减沙效应的时间过程规律、复杂响应与空间尺度效应。

三、项目的主要研究进展

2003~2006年,经过项目组全体研究人员4年的辛勤努力,完成了项目的研究任务,实现了研究目标。共发表论文102篇,其中SCI索引论文20篇,EI源刊物论文11篇,核心刊物论文66篇。项目的研究成果,在基础理论研究方面,深化了气候-植被-侵蚀耦合理论、水土保持减沙效应临界理论、坡面-沟道耦合系统侵蚀产沙理论、侵蚀产沙尺度效应理论和多营力耦合侵蚀产沙理论;在应用基础研究方面,提出了3个有一定应用前景的方法,即黄土高原水土保持植被配置的合理性分析方法、临界水保面积的确定方法、黄土高原治理前景分析方法;在模型研究方面,建立了两个实体模型,即室内植被-侵蚀模拟模型、野外微型流域演化与侵蚀产沙模拟模型;一个数学模型,即基于土地生产力与土地利用结构调整的水土保持措施优化配置模型;同时,基于产沙模数与流域面积之间的关系,建立了对尺度效应进行校正的方法,编制了消除尺度效应之后的黄土高原产沙模数图。

项目所取得的主要进展,可以概括如下:

(1) 研究了降水-植被耦合关系及其对黄土高原侵蚀的影响,发现了森林覆盖率和降水侵蚀力随年降水量的变化的两个临界点,以及侵蚀强度随年降水量和植被覆盖度变化的临界点。从分析植被抗蚀力和降水侵蚀力的对比关系入手,解释了黄土高原地区侵蚀强度随年降水变化的非线性图形。

(2) 基于乔木面积在乔木、灌木、草本总面积中的比例与年降水量之间的回归分析,提出了确定使乔木面积在乔木、灌木、草类总面积中的较优比例的方法。

(3) 基于岔巴沟径流实验资料,研究了黄土高原丘陵沟壑区坡面-沟道系统中的高含

沙水流。研究发现,高含沙水流形成于崩坡下部和沟坡,并在各级沟道中进一步发展;在坡面-沟道系统中,存在着泥沙的存储-释放机制,这一机制与非高含沙水流和高含沙水流不同的输沙行为有关。

(4) 以大量实测资料为基础研究了黄河流域干支流的产沙模数与流域面积之间的关系,发现在黄河流域干支流的产沙模数随流域面积的变化是非线性的,并建立了不同分区的产沙模数尺度效应校对方程。对各站点的产沙模数进行了 1000km^2 标准面积的校正以消除尺度的影响,并用 Kriging 插值法制作了消除尺度影响后的产沙模数图。

(5) 通过室内模拟实验发现,坡面及沟坡平均流速随坡面草被覆盖度的增加呈下降趋势;坡面径流平均曼宁糙率系数和平均阻力系数随坡面草被覆盖度的增加而增加;随草被覆盖度的增加,沟坡产沙比呈增加趋势;要减少坡沟侵蚀,搞好沟坡的防护至关重要。

(6) 坡面发育的室内模拟试验表明,裸坡黄土坡面侵蚀产沙过程可划分为细沟形成阶段、细沟发展阶段和细沟发育稳定阶段。坡沟系统的输沙率和含沙量过程随降水强度的增大而增大,但变化趋势不尽相同;沟坡径流量与沟谷部分净侵蚀产沙量呈幂函数关系。

(7) 典型小流域治理措施优化配置突出了大封禁、小治理的新思路,同时确定了不同分区的布坝密度,为黄河多沙粗沙区的水土流失治理提供了比较坚实的理论依据,具有重要的实践指导作用。

(8) 采用 GIS 和多个数学模型相结合的方法,建立了基于土壤水分分布的土地利用空间优化模型。根据所建立的优化模型,在多目标优化软件平台中编程运算,得到了区域土地利用优化数量结果。

(9) 研究发现,流域水土保持存在着一个临界面积,只有当水土保持面积超过这一临界值后,水土保持措施对河流泥沙的影响在统计意义上才会显著,并推求出黄土丘陵区河流的临界水土保持面积应为流域水土流失面积的 21%。

(10) 在 1970 年以来多沙粗沙区入黄泥沙量减少的总体背景之上,还叠加着 1986 ~ 1997 年入黄泥沙量增加的近期趋势。在降水可比的条件下,与 20 世纪 80 年代相比,90 年代的减沙效益有所衰减。基于这一研究,提出了对策建议。

(11) 研究发现,水土保持措施极大地改变了流域泥沙的侵蚀、输移和堆积过程,由于流域中人为沉积汇的形成,导致了泥沙输移比大幅度减小。

四、本书的结构

全书共分为 13 章。第一章为绪论,概括地介绍了项目的研究区、研究内容和取得的主要进展。其余 12 章,分别围绕项目的 3 项研究内容来展开论述。项目的第一项研究内容为气候-植被-侵蚀相互作用与耦合关系,由第二章至第四章来进行论述,分别阐述宏观尺度上的气候-植被-侵蚀相互作用、坡面与沟道挟沙水流与植被的相互作用和黄土高原植被地貌演化及其与水土保持的关系。第十一章也与此有关,阐述了侵蚀-植被相互作

用过程中的临界现象。项目的第二项研究内容为坡面-沟道耦合关系及其侵蚀产沙效应,主要由第五章进行论述;第七章和第八章也与此有关,分别阐述坡面-沟道系统中的高含沙水流和植被恢复对坡面-沟道系统侵蚀产沙的影响。项目的第三项研究内容为水土保持减沙效益的临界规律、尺度效应与复杂响应,主要由第九章、第十章、第十二章、第十三章进行论述,分别阐述了水土保持措施优化配置模式、水土保持措施减沙效应及其临界现象、侵蚀产沙及水土保持减沙的空间尺度效应与时间过程规律等。第六章也与此有关,阐述了坝系系统稳定理论。

第二章 宏观尺度上的气候 - 植被 - 侵蚀相互作用研究

降水、植被与侵蚀过程三者之间关系的研究,是地表过程领域中重要的科学问题,迄今未能完全解决。这一问题的研究,既可以在空间中展开,又可以在时间过程中展开,并涉及不同的空间和时间尺度。不同地点的降水特征以及与降水密切相关的植被特征之间,具有特定的组合关系,这种组合关系决定了不同地点具有不同的侵蚀产沙特征,因而使得侵蚀现象在宏观上表现出一定的地域性或者地带性分布。从降水-植被-侵蚀耦合关系入手,深入地揭示这种地域性或地带性分布的形成机理,有可能为通过植被恢复来治理水土流失、减少河流泥沙,提供更为坚实的决策依据。我们对于宏观尺度上气候-植被-侵蚀的相互关系(许炯心,2006a; Xu Jiongxin, 2005)、黄土高原治理前景(陆中臣等,2005)、黄土高原水土保持植被配置的合理性分析(许炯心,2005a)、气候条件对黄土高原水土保持植被结构的影响及其在植被建设中的意义(许炯心,2004a)进行了研究,并取得了一定的进展。

第一节 宏观尺度上气候-植被-侵蚀的相互关系*

一、问题的提出

由于植被作用的存在,降水和侵蚀产沙之间的关系不是线性的,而是非线性的、复杂的,可以用图2-1中所示的框图来表示。某一地点的侵蚀强度,取决于降水侵蚀力、暴雨径流侵蚀力与地表抗蚀力之间的对比关系。降水侵蚀力是降水特性的函数,暴雨径流侵蚀力也与暴雨特性密切相关。一般而言,年降水量越大,暴雨强度越大,则降水侵蚀力与暴雨径流侵蚀力也越大,二者之间表现为正相关关系。地表抗蚀力可以分解为地表植被抗蚀力和地表物质抗蚀力。前者直接取决于植被状况,后者则与地表物质的性质(如岩石类型)和粒度组成、土壤的物理化学性质有关。因为成土过程与植被作用有关,所以在一定程度上土壤特性与植被之间也具有一定的联系。植被是一种地带性的自然地理要素,其宏观空间分布格局与年降水量之间有着十分密切的关系。年降水量决定着天然植被的类型、生物量积累和植被对地表的覆盖状况。一般而言,年降水量越大,则植被的生物量越大、对地表的保护作用越强,故植被抗蚀力也越强,由此形成了年降水量与地表植被抗蚀力之

* 本节执笔人为许炯心

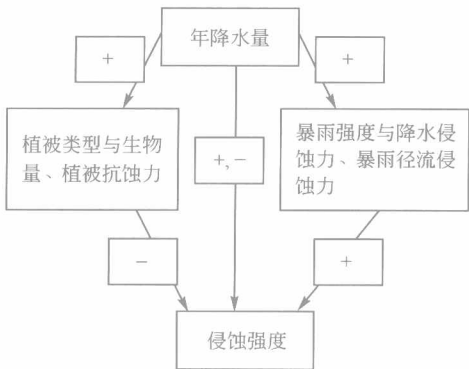


图 2-1 侵蚀强度与年降水量关系
注：箭头上的正（+）、负（-）号分别表示正
相关和负相关

间的正相关关系。由上述分析可知，由于植被作用的加入，使得年降水量与侵蚀强度之间的关系具有不确定性。当年降水量较大时，降水所产生的侵蚀力也较大，这可能导致较高的侵蚀强度；然而，当多年平均年降水量较大时，与之相联系的天然植被的抗蚀力也较强，这又可能导致较低的侵蚀强度。换言之，如果在某一地点，降水侵蚀力的作用居于主导地位，植被抗蚀力的作用居于次要地位，则年降水量和侵蚀强度的关系可表现为正相关；如果在另一地点，植被抗蚀力的作用居于主导地位，而降水侵蚀力的作用居于次要地位，则年降水和侵蚀强度之间的关系可表现为负相关。因此，从图 2-1 中所示的简单的概念模式可知，侵蚀产

沙与年降水特征之间可能存在着复杂的、非线性的关系。这已为前人的研究所证实。

早在 1958 年，美国学者 Langbein 和 Schumm 就以美国中部和东部若干流域的资料为基础，建立了流域产沙模数与年有效降水量之间的关系。该关系表明，随着有效降水量的增大，产沙模数先是增大，并达到峰值；当降水量进一步增大时，产沙模数则减小。其后，这一变化图形得到了世界上不同地区研究成果的证实（Douglas, 1967；Walling et al., 1983；Wilson, 1973），被称为 Langbein-Schumm 关系。许炯心（1994）运用中国近 700 个流域的资料对 Langbein-Schumm 关系进行了验证，揭示了我国侵蚀产沙的地带性规律，认为这一规律可以用 Langbein-Schumm 关系来解释。他还以黄河若干支流的水文资料和气象资料为基础，建立了产沙模数与年降水量的关系，其变化图形与 Langbein-Schumm 关系类似（许炯心，2000a）。然而，迄今为止，对上述图形形成机理的解释尚有待于深化。我们在前人工作的基础上，以黄土高原地区的大量实测资料验证图 2-1 中的概念模式，揭示了降水-植被耦合关系对侵蚀产沙的影响，确定了其中的若干临界值，并为黄土高原生态环境建设的布局规划和措施配置提出若干建议。

二、研究区概况

研究所涉及的范围为广义的黄土高原地区（图 2-2），包括黄土高原及其以北邻区，除了太行山以西、日月山-贺兰山以东、秦岭以北、长城以南的黄土高原主体以外，还包括长城以北至阴山以南的广大风沙地区（杨勤业，袁宝印，1991）。这一地区位于从干旱气候、半干旱气候向半湿润气候的过渡区。从西北向东南，年降水量在 200 ~ 700mm 变化，自然植被类型则由干旱荒漠，经干旱草原、森林草原、草原森林过渡为暖温带落叶阔叶林，地表物质由风成沙、沙黄土向典型黄土和黏黄土过渡。这一地区自然条件的空间变化梯度大，侵蚀强度的空间差异亦大，是研究降水-植被耦合关系对侵蚀产沙影响的理想