

水 科 学 前 沿 丛 书

# 黄河近年水沙锐减成因

刘晓燕 等 著



科学出版社

水科学前沿丛书

# 黄河近年水沙锐减成因

刘晓燕 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

黄河天然时期多年平均来沙量 16 亿 t (陕县, 1919~1960 年), 天然径流量 559 亿  $\text{m}^3$  (花园口, 1919~1975 年)。然而, 在年均降水量基本正常的 2000~2014 年, 黄河年均来沙量只有 2.7 亿 t, 天然径流量仅 456 亿  $\text{m}^3$ , 水沙减少程度远超过 1919~2000 年的任何时期, 引起人们高度关注。

本书采用遥感调查、实地查勘、实测数据分析和数值模拟等多种手段, 对 20 世纪 50 年代以来的降雨和水沙变化, 以及水库、淤地坝、林草植被、梯田、灌溉引水、河道冲淤和煤矿开采等主要下垫面因素进行了全面调查, 基本查清了黄河近年水沙锐减的原因和各因素贡献。

本书可供从事相关领域研究、规划、管理、设计和治理的专业技术人员、教师和学生阅读与参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

黄河近年水沙锐减成因/刘晓燕等著. —北京: 科学出版社, 2016.12

(水科学前沿丛书)

ISBN 978-7-03-051159-1

I. ①黄… II. ①刘… III. ①黄河—含沙水流—变化—研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 314409 号

责任编辑: 朱海燕 丁传标 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 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>

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

\*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 23 3/4 插页: 5

字数: 570 000

定价: 179.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《水科学前沿丛书》编委会

(按姓氏汉语拼音排序)

|   |   |     |     |     |     |
|---|---|-----|-----|-----|-----|
| 顾 | 问 | 曹文宣 | 陈志恺 | 程国栋 | 傅伯杰 |
|   |   | 韩其为 | 康绍忠 | 雷志栋 | 林学钰 |
|   |   | 刘鸿亮 | 卯智  | 孟伟  | 王超  |
|   |   | 王光谦 | 王浩  | 薛禹群 | 张建云 |
|   |   | 张勇传 |     |     |     |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 主 | 编 | 刘昌明 |
|---|---|-----|

|       |     |
|-------|-----|
| 常务副主编 | 徐宗学 |
|-------|-----|

|   |   |     |     |     |     |
|---|---|-----|-----|-----|-----|
| 编 | 委 | 蔡崇法 | 常剑波 | 陈求稳 | 陈晓宏 |
|   |   | 陈永灿 | 程春田 | 方红卫 | 胡春宏 |
|   |   | 黄国和 | 黄介生 | 纪昌明 | 康跃虎 |
|   |   | 雷廷武 | 李怀恩 | 李义天 | 林鹏  |
|   |   | 刘宝元 | 梅亚东 | 倪晋仁 | 牛翠娟 |
|   |   | 彭世彰 | 任立良 | 沈冰  | 王忠静 |
|   |   | 吴吉春 | 吴建华 | 徐宗学 | 许唯临 |
|   |   | 杨金忠 | 郑春苗 | 周建中 |     |

# 《水科学前沿丛书》出版说明

随着全球人口持续增加和自然环境不断恶化，实现人与自然和谐相处的压力与日俱增，水资源需求与供给之间的矛盾不断加剧。受气候变化和人类活动的双重影响，与水有关的突发性事件也日趋严重。这些问题的出现引起了国际社会对水科学研究的高度重视。

在我国，水科学研究一直是基础研究计划关注的重点。经过科学家们的不懈努力，我国在水科学研究方面取得了重大进展，并在国际上占据了相当地位。为展示相关研究成果、促进学科发展，迫切需要对过去几十年国内外水科学不同分支领域取得的研究成果进行系统性的梳理。有鉴于此，科学出版社与北京师范大学共同发起，联合国内重点高等院校与中国科学院知名中青年水科学专家组成学术团队，策划出版《水科学前沿丛书》。

丛书将紧扣水科学前沿问题，对相关研究成果加以凝练与集成，力求汇集相关领域最新的研究成果和发展动态。丛书拟包含基础理论方面的新观点、新学说，工程应用方面的新实践、新进展和研究技术方法的新突破等。丛书将涵盖水力学、水文学、水资源、泥沙科学、地下水、水环境、水生态、土壤侵蚀、农田水利及水力发电等多个学科领域的优秀国家级科研项目或国际合作重大项目的成果，对水科学研究的基础性、战略性和前瞻性等方面的问题皆有涉及。

为保证本丛书能够体现我国水科学研究水平，经得起同行和时间检验，组织了国内多名院士和知名专家组成丛书编委会，他们皆为国内水科学相关领域研究的领军人物，对各自的分支学科当前的发展动态和未来的发展趋势有诸多独到见解和前瞻思考。

我们相信，通过丛书编委会、编著者和科学出版社的通力合作，会有大批代表当前我国水科学相关领域最优秀科学研究成果和工程管理水平的著作面世，为广大水科学研究者洞悉学科发展规律、了解前沿领域和重点方向发挥积极作用，为推动我国水科学研究和水管理做出应有的贡献。

刘昌明

2012年9月

# 序 一

黄河有多少水、有多少沙，这个问题是决定治黄方略的首要问题。因为沙多水少，黄河下游善淤、善变、善徙，每有洪水，常常引起大灾，素有“三年两决口，百年一改道”之说。因此，无论是历代帝王，还是当代中国政府，无不把黄河治理当做头等大事。为解决泥沙淤积问题，黄河下游不得不设置 10~20km 的堤距，干支流水库也必须设计巨大的拦沙库容，而且还在黄土高原的千沟万壑修建数万座主要用于拦沙造地的淤地坝。

然而，到了 21 世纪，黄河的水沙形势发生了巨大变化，来沙量由“16 亿 t/a”减少至 2 亿~3 亿 t/a、2014 年和 2015 年甚至只有 0.69 亿 t 和 0.55 亿 t，黄土高原很多河流的来水量也大幅度减少。是什么原因导致黄河水沙形势发生如此巨变？未来黄河还会有多少水沙？以“减淤”为主线的黄河治理方略是否需要调整？这些问题是近几年广受关注的热点问题，也是黄土高原向所有水文泥沙研究者提出的挑战。刘晓燕和她的团队接受了这个挑战。通过四年多的艰苦努力，研究团队提出了一份令众多知名专家满意的答卷。

20 世纪 60 年代，我曾经在黄土高原坚守 4 年开展降雨-产流-产沙野外试验，也参与了这几年刘晓燕团队组织的多次野外考察和成果咨询，认为该成果的突出特点有三个。

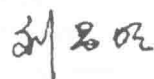
一是基础数据扎实、可靠。为了摸清近年降雨变化情况，他们采集了 604 个雨量站 1198 万个逐年逐日数据；为了摸清黄土高原下垫面变化，他们利用 20 世纪 70 年代以来不同时期的卫星遥感影像，完成了不同时期的土地利用、植被盖度和梯田面积解译工作，而且选择近 200 个 GPS 点、行程约 20 万 km 对解译数据进行校验，反复纠错；为了摸清淤地坝和水库在近年的实际淤积量，他们几乎走访了所有大中型水库，并 5 次对 200 多座骨干坝的淤积情况进行抽样实测；为摸清各地用水实况，他们走访了研究区所有地市级水利部门、一半以上的县级水利部门和所有大型灌区；为了充分认识下垫面变化特点，他们组织了 7 次大规模考察和数十次专题调查，实地查勘了研究区 80% 以上的县区。这种对基础数据的认真态度，当今已不多见。

二是计算方法科学、合理。利用遥感数据阐明黄土高原的植被变化，是近年广泛采用的研究方法，但基于遥感数据、面对 30 万 km<sup>2</sup> 且地貌复杂多样的黄土高原，如何计算出林草植被和梯田变化对流域水沙的影响量，并且得到验证，这在国内是第一次，在世界范围内也属首创。同时，他们应用数据挖掘的理念，发现了黄土高原淤地坝拦沙库容淤满的标准，从而为近 6 万座淤地坝近年实际拦沙量的计算提供了坚实的基础；综合运用水文学和水文地质知识，首次发现了岩溶区水库蓄水对河流-泉水补、径、排关系的影响机制；所采用的“水文法”虽然是现有的研究方法，但对模型的参数选择和函数形式进行了深入分析和改造，从而使水文模型更科学可靠。

三是国内众多科学家参与。在项目研究的四年多时间里，除了项目组 100 多位研究人员外，相关专业领域的 60 多位院士和知名专家也参与了多次实地考察和成果咨询。项目组充分吸纳了多方面专家的意见，并进行了认真修改。

基于以上三点，以及自己几十年来对黄土高原的认识，我认为这个项目提出的研究结论是可信可靠的，成果对今后黄河治理方略和措施的确定具有深远意义，希望读者能够从书中汲取其丰富信息，对黄河未来水沙情势给予更多关注。

中国科学院院士



2016 年 3 月

## 序 二

之所以为该书作序，是因为我非常看重这个成果的意义和价值。

近几年，黄河研究最引人注目的问题莫过于水沙锐减问题。黄河诸多问题的症结在于泥沙，由于水少沙多，导致黄河下游河床淤积严重，并成为举世闻名的地上悬河；也是因为水少沙多，尽管地处严重缺水地区，黄河水资源利用时不得不留下约1/3作为输沙用水。然而，2000年以来，黄河来沙量由16亿t/a变成了2亿~3亿t/a，黄土高原主要产沙支流的来水量也减少约50%，变化之剧烈，未能所料。

黄河近年水沙锐减已经是不争的事实，如何认识水沙锐减原因和未来水沙变化趋势，是相关科研和生产单位共同关注的问题。2011年年底，国家“十二五”科技支撑计划对黄河水沙锐减问题进行立项研究。同时，作为水利部指定的项目专家组组长，我也参与了该项目和相关单位组织的多次黄土高原科学考察、成果咨询和技术研讨。

经过4年多研究，刘晓燕团队给出了他们的答卷，认为下垫面变化是黄河近年水沙锐减原因，其中，林草植被和梯田等坡面因素减沙贡献率约占80%、水库和淤地坝等沟道因素减沙贡献率约占20%；在目前的林草植被和梯田情况下，如果坝库不拦沙，多年平均降雨情况下潼关年均来沙量可能只有4.5亿~5亿t、最大15亿~16亿t；在大幅度减沙的同时，林草、梯田、淤地坝和水库的蒸发蒸腾也使黄河来水减少约60亿m<sup>3</sup>；加上地下水利用、煤矿开采和岩溶区水库蓄水等因素影响，多年平均降雨情况下的花园口天然径流量已经由1919~1975年的560亿m<sup>3</sup>减少为现在的460亿m<sup>3</sup>。根据自己近年多次黄土高原实地考察和水沙变化讨论了解到的情况，我认为这个结论基本合理。

黄河水沙情势事关治黄方略确定和重大工程布局，事关黄河下游宽河段治理的方向。要阐明黄河近年水沙变化原因、说清未来水沙变化趋势，关键在于两点，一是基础数据可靠；二是计算方法科学，这两点是刘晓燕团队在过去几年下功夫最多的地方，也是众多科学家对其成果褒奖最多的地方。最近得知国家将继续支持黄河水沙变化研究，我相信该书所提出的基础数据和科学方法，能够为未来的研究者提供宝贵借鉴。

中国科学院院士



2016年3月



# 前 言

黄河陕县站天然时期多年平均来沙量 16 亿 t (1919~1959 年)、年最大来沙量 39.1 亿 t, 多年平均天然径流量 559 亿  $\text{m}^3$  (花园口站, 1919~1975 年)。然而, 2000~2014 年, 黄河年均来沙量只有 2.7 亿 t, 天然径流量仅 456 亿  $\text{m}^3$ , 水沙减少程度远超过 1919~2000 年的任何时期。黄河近年出现的水沙减少是周期性变化、还是趋势性变化? 在多年平均降雨情况下, 今后的黄河还会有多少水沙? 极端降雨情况下的水沙情景如何? 这些问题直接影响到黄河下游等重点河段的治理方向、水沙调控工程的布局 and 运用、黄河水资源配置和利用策略。

黄河近年出现的水沙剧减现象引起了人们的广泛、高度关注。2011 年年底, 黄河中游近年水沙锐减成因研究被列入国家“十二五”科技支撑计划, 成为“黄河水沙调控技术研究与应用”项目中的两个课题, 课题名称分别为“黄河中游河川径流锐减驱动力及人为调控效应研究”(课题编号 2012BAB02B04)和“黄河中游来沙锐减主要驱动力及人为调控效应研究”(课题编号 2012BAB02B05), 研究周期为 2012~2015 年。课题的研究目标是, 分析水沙、降雨和下垫面的变化特点, 揭示典型下垫面因素对流域水沙的影响机制, 开发相关评价方法, 阐明近年水沙锐减的驱动力及其量化贡献。

本书是该项研究成果的总结。项目通过是否改变、谁使其变、如何致变和变化趋势四个层次的分析, 深入分析了研究区气候和下垫面变化情况、黄河近年水沙锐减的主要驱动力及其量化贡献, 并初步对黄河的未来水沙情势进行了展望。

参加本次研究的单位和个人主要包括: 黄河水利科学研究院李小平、李勇、田勇、党素珍、张楠、肖培青、马静、侯素珍、张晓华、孙一、郭欣伟、侯志军、郭彦、何宏谋、苏晓慧、顾志刚、高际平、田世民、任智慧、张敏、彭红、张明武、尚红霞、郑艳爽和王平等, 北京师范大学杨胜天、罗娅、周旭、赵海根、陈锡云、宋文龙、王红瑞、张亦池和吴琳娜等, 黄河上中游管理局何兴照、王富贵、郭玉涛、高云飞、马红斌、李晶晶、刘斌、许小梅、吴永红、王秦湘、王庆、李志华、曹雪峰、王娜、徐佳、屈创、王帆、王丽云、岳本江、王晓、林震、苏广旭、党维勤、艾绍周、李尧、张智忠、于永忠和尹智军等, 黄委会水文局李晓宇、金双彦、潘启民、张红月、李东、蒋秀华、高亚军、张学成、李焯、林银平、张萍、张展、张遂业、屠新武、陈鸿、高文永、高国甫、马志瑾、胡著翱、王玉明、李雪梅和李亚菲等, 郑州大学吴泽宁、胡彩虹、平建华、管新建、魏冲、郭亚南、李勇、张照玺、高申和颜时延等, 中国科学院水利部水土保持研究所温仲明、焦菊英和赵广举等, 华北水利电力大学张丽、郭菲、孟美丽、蒋莉、孙垦、张巍巍、杨文海、王超和赵茹等, 黄河水利委员会信息中心杨阳和刘学工等。

本书主要由刘晓燕撰写和统稿, 各章主要执笔人如下。

第1章：刘晓燕。

第2章：刘晓燕。

第3章：刘晓燕，李晓宇，金双彦，郭玉涛，王富贵，罗娅，周旭。

第4章：刘晓燕，李晓宇，党素珍。

第5章：刘晓燕，杨胜天，高云飞，郭玉涛，王富贵，田勇，罗娅，周旭。

第6章：刘晓燕，高云飞，郭玉涛，田勇，张丽，李小平，杨阳。

第7章：刘晓燕，杨胜天，李小平，温仲明，王富贵，李晶晶。

第8章：刘晓燕，高云飞，杨胜天，罗娅。

第9章：刘晓燕，潘启民，党素珍，张楠。

第10章：刘晓燕，杨胜天，周旭，高云飞。

第11章：刘晓燕，温仲明，李小平。

第12章：刘晓燕，党素珍。

附件：刘晓燕，金双彦，李晓宇，高亚军。

附图制作：胡著翱，高云飞，高亚军。

承蒙黄自强、李良年和洪尚池等专家对全书进行了认真审阅，并提出了很多宝贵的修改意见。

研究工作期间，黄河水利委员会科学技术委员会、规划计划局、水土保持局、国际合作与科技局、水资源管理与调度局、总工程师办公室、黄河水利委员会水文局、黄河上中游管理局、黄河勘测规划设计有限公司和黄河水利委员会信息中心，以及内蒙古、陕西、甘肃、山西、宁夏等省（自治区）水利厅和水文主管单位以及下属的市（区、县）水务部门等，为本次研究顺利开展提供了科学考察、资金、基础数据和基础图件支持。国内很多知名专家，包括孙鸿烈、刘昌明、胡四一、王浩、王光谦、张建云、傅伯杰、朱尔明、宁远、胡春宏、汪集旸、孙九林、夏军、倪晋仁、富增慈、唐克丽、王忠静、陈敏建、贾仰文、刘国彬、周志芳、范立民、穆兴民、卢金友、程积民、吴发启、李占斌、郑粉莉、刘宝元、黄河清、戴永久、贾绍凤、宋献方、于静洁、王正秋、于洪涛和张建国等，以及黄河水利委员会陈效国、黄自强、薛松贵、李文学、洪尚池、李良年、赵业安、李文家、翟家瑞、胡一三、邓盛明、席家治、李世滢、汪习军、陈伯让、吴宾格、王渭泾、赵卫民、王玲、熊贵枢、潘贤娣、王煜、江恩惠、姚文艺和安催花等，多次对本次研究成果咨询指导，在此深表感谢。

# 目 录

《水科学前沿丛书》出版说明

序一

序二

前言

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第1章 绪论 .....         | 1  |
| 1.1 研究范围与研究对象 .....  | 1  |
| 1.2 研究方法 .....       | 3  |
| 1.3 主要研究结论 .....     | 3  |
| 1.4 进展与创新 .....      | 5  |
| 第2章 黄河水沙变化概况 .....   | 7  |
| 2.1 研究区概况 .....      | 7  |
| 2.2 水沙通量及其特点 .....   | 8  |
| 2.2.1 水沙通量 .....     | 8  |
| 2.2.2 水沙特点 .....     | 11 |
| 2.3 近年水沙变化 .....     | 15 |
| 2.3.1 水沙变化概况 .....   | 15 |
| 2.3.2 水沙变化特点 .....   | 16 |
| 2.3.3 典型支流水沙变化 ..... | 19 |
| 2.4 现有研究成果回顾 .....   | 24 |
| 参考文献 .....           | 26 |
| 第3章 基础数据的采集与处理 ..... | 27 |
| 3.1 水文气象数据 .....     | 27 |
| 3.1.1 降水数据 .....     | 27 |
| 3.1.2 水沙数据 .....     | 30 |
| 3.1.3 气温与蒸发数据 .....  | 31 |
| 3.2 淤地坝数据 .....      | 31 |
| 3.2.1 现状骨干坝 .....    | 31 |
| 3.2.2 现状中小淤地坝 .....  | 31 |
| 3.2.3 坝地面积 .....     | 32 |
| 3.3 水库数据 .....       | 32 |
| 3.4 梯田数据 .....       | 33 |
| 3.4.1 现状梯田数据 .....   | 33 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.4.2 早期梯田数据.....               | 35 |
| 3.5 林草植被数据.....                 | 35 |
| 3.5.1 数据源.....                  | 36 |
| 3.5.2 土地利用.....                 | 38 |
| 3.5.3 植被盖度.....                 | 39 |
| 3.6 供水量和天然径流量数据.....            | 41 |
| 3.7 其他下垫面要素.....                | 41 |
| 参考文献 .....                      | 42 |
| <b>第4章 气候变化及其对入黄水沙的影响</b> ..... | 43 |
| 4.1 主要产沙区降雨特点.....              | 43 |
| 4.2 主要产沙区降雨-产洪-产沙特点 .....       | 44 |
| 4.3 近年降雨变化分析.....               | 47 |
| 4.3.1 主要产沙区.....                | 47 |
| 4.3.2 主要来水区.....                | 52 |
| 4.4 主要产沙区暴雨覆盖范围变化.....          | 54 |
| 4.5 气温与蒸发变化.....                | 56 |
| 4.6 降雨-产流-产沙关系变化.....           | 57 |
| 4.6.1 降雨-产流关系变化 .....           | 57 |
| 4.6.2 降雨-产沙关系变化 .....           | 59 |
| 4.6.3 典型年降雨-产沙对比 .....          | 59 |
| 4.6.4 水沙变化的阶段特点.....            | 63 |
| 4.7 降雨及非降雨因素变化对近年入黄水沙的影响.....   | 65 |
| 4.7.1 方法原理.....                 | 65 |
| 4.7.2 减沙量计算.....                | 67 |
| 4.7.3 减水量计算.....                | 76 |
| 4.8 近年降雨变化及其水沙响应综合分析.....       | 79 |
| 参考文献 .....                      | 81 |
| <b>第5章 下垫面变化分析</b> .....        | 83 |
| 5.1 淤地坝的发展与现状.....              | 83 |
| 5.1.1 淤地坝发展历程.....              | 83 |
| 5.1.2 现状规模及其时空分布.....           | 84 |
| 5.2 水库的发展与现状.....               | 87 |
| 5.3 现状梯田的面积与质量.....             | 89 |
| 5.3.1 现状梯田面积与分布.....            | 89 |
| 5.3.2 梯田面积发展过程.....             | 91 |
| 5.3.3 现状梯田的质量与种植结构.....         | 93 |
| 5.4 近40年黄河主要产沙区林草植被变化.....      | 96 |
| 5.4.1 基于遥感的林草植被特征指标选择.....      | 96 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 5.4.2 | 林草地面积与盖度变化        | 99  |
| 5.4.3 | 易侵蚀区林草覆盖率变化       | 106 |
| 5.4.4 | 林草植被结构变化          | 108 |
| 5.4.5 | 植被变化过程            | 112 |
| 5.4.6 | 近年林草植被改善的主要驱动力    | 113 |
| 5.5   | 其他土地利用类型变化        | 114 |
| 5.5.1 | 小型水土保持设施          | 114 |
| 5.5.2 | 建设用地              | 116 |
| 5.6   | 黄河典型产水区植被变化       | 116 |
| 5.7   | 下垫面变化综合分析         | 117 |
|       | 参考文献              | 118 |
| 第6章   | 现状沟(河)道工程的减水减沙量分析 | 120 |
| 6.1   | 淤地坝减沙作用           | 120 |
| 6.1.1 | 淤地坝拦沙作用的计算方法      | 120 |
| 6.1.2 | 2007~2011年实际拦沙量计算 | 126 |
| 6.1.3 | 2007~2014年实际拦沙量分析 | 128 |
| 6.1.4 | 坝地的减蚀作用           | 131 |
| 6.1.5 | 结果合理性分析           | 132 |
| 6.2   | 水库拦沙作用            | 134 |
| 6.2.1 | 中游水库实际拦沙量计算       | 134 |
| 6.2.2 | 上游水库实际拦沙量分析       | 137 |
| 6.3   | 蓄水工程新增蒸发损失        | 140 |
| 6.3.1 | 计算方法              | 140 |
| 6.3.2 | 水库蒸发损失            | 141 |
| 6.3.3 | 骨干坝蒸发损失           | 141 |
| 6.3.4 | 景观水面蒸发损失          | 144 |
| 6.3.5 | 坝库工程新增蒸发损失小计      | 144 |
| 6.4   | 坝地的减水作用           | 148 |
| 6.5   | 坝库对洪水含沙量的影响       | 148 |
| 6.6   | 坝库减水减沙作用的时效性      | 149 |
| 6.6.1 | 淤地坝               | 149 |
| 6.6.2 | 水库                | 151 |
| 6.7   | 用水及其引沙            | 152 |
| 6.7.1 | 雨水就地集蓄利用调查        | 152 |
| 6.7.2 | 灌溉引沙量分析           | 153 |
| 6.8   | 河道冲淤分析            | 155 |
| 6.8.1 | 宁蒙河段              | 155 |
| 6.8.2 | 中游冲积性河段           | 157 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 6.8.3 山丘区河段.....                   | 158        |
| 6.9 现状沟(河)道工程减沙作用综合分析.....         | 159        |
| 参考文献 .....                         | 160        |
| <b>第7章 坡沟要素变化对流域产水产沙的调控机制.....</b> | <b>161</b> |
| 7.1 黄土丘陵区产沙过程及其驱动力.....            | 161        |
| 7.1.1 流域坡沟系统.....                  | 162        |
| 7.1.2 梁峁坡产沙.....                   | 162        |
| 7.1.3 沟谷坡和沟床产沙.....                | 166        |
| 7.1.4 流域产沙.....                    | 170        |
| 7.2 黄土丘陵区高含沙水流的形成和发展.....          | 172        |
| 7.2.1 高含沙水流形成的关键因素.....            | 172        |
| 7.2.2 推高水流含沙量的关键因素.....            | 174        |
| 7.3 黄土丘陵盖沙区的产沙驱动力.....             | 177        |
| 7.4 黄土高塬沟壑区的产沙驱动力.....             | 178        |
| 7.5 黄土高原的产汇流及其影响因素.....            | 182        |
| 7.6 不同规模梯田运用的流域水沙响应.....           | 185        |
| 7.6.1 梯田对坡沟水沙的调控机制.....            | 185        |
| 7.6.2 不同规模梯田的产沙响应.....             | 189        |
| 7.6.3 不同规模梯田的产水响应.....             | 196        |
| 7.6.4 梯田运用对洪水含沙量的影响.....           | 198        |
| 7.7 林草植被变化的流域水沙响应.....             | 199        |
| 7.7.1 黄土丘陵区林草植被对沟坡水沙的调控机制.....     | 199        |
| 7.7.2 黄土丘陵区林草植被变化的流域产沙响应.....      | 202        |
| 7.7.3 黄土丘陵盖沙区林草植被变化的流域产沙响应.....    | 210        |
| 7.7.4 黄土区林草植被变化的河川径流响应.....        | 213        |
| 7.7.5 黄土丘陵盖沙区林草植被变化的河川径流响应.....    | 218        |
| 7.7.6 土石山区林草植被变化的河川径流响应.....       | 219        |
| 7.7.7 植被变化对洪水含沙量的影响.....           | 220        |
| 7.8 自然修复植被与人工植被的产流产沙差异.....        | 221        |
| 7.9 梯田与植被变化的流域水沙响应机制综合分析.....      | 225        |
| 参考文献 .....                         | 227        |
| <b>第8章 近年坡沟要素变化对入河水沙量的影响.....</b>  | <b>231</b> |
| 8.1 计算方法选择.....                    | 231        |
| 8.2 基于黄河遥感水文分析模型的减水减沙分析.....       | 233        |
| 8.2.1 黄河遥感水文分析模型及其应用方法.....        | 233        |
| 8.2.2 1919~1975年林草植被状况推演.....      | 238        |
| 8.2.3 不同时期林草与梯田减水减沙量计算结果.....      | 244        |
| 8.2.4 其他坡沟要素变化的减沙量分析.....          | 246        |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| 8.3 基于 LCM-MUSLE 模型的河龙区间植被变化的产沙响应 ..... | 248        |
| 8.3.1 LCM-MUSLE 模型框架 .....              | 248        |
| 8.3.2 LCM-MUSLE 因子计算方法 .....            | 249        |
| 8.3.3 河龙间植被变化对入河沙量的影响 .....             | 252        |
| 8.4 黄土高原产沙环境变化 .....                    | 255        |
| 8.4.1 历史时期产沙环境变化 .....                  | 255        |
| 8.4.2 近 40 年产沙环境变化 .....                | 259        |
| 8.5 林草与梯田减水减沙量综合分析 .....                | 265        |
| 参考文献 .....                              | 267        |
| <b>第 9 章 区域补径排关系变化及其对河川径流的影响</b> .....  | <b>271</b> |
| 9.1 地下水开采对河川径流的影响 .....                 | 271        |
| 9.1.1 区域水文地质概况 .....                    | 271        |
| 9.1.2 地下水开发利用变化情况 .....                 | 272        |
| 9.1.3 地下水利用对河川径流的影响 .....               | 273        |
| 9.2 天桥泉域与黄河的补排关系变化 .....                | 276        |
| 9.2.1 问题的提出 .....                       | 276        |
| 9.2.2 泉域与黄河之间的天然补排关系 .....              | 276        |
| 9.2.3 水库蓄水对岩溶水补排关系的影响 .....             | 280        |
| 9.2.4 补排关系变化对黄河径流的定量影响 .....            | 283        |
| 9.3 煤矿开采对河川径流的影响 .....                  | 284        |
| 9.3.1 原煤赋存及开采情况调查 .....                 | 284        |
| 9.3.2 煤矿开采对补径排关系的改变 .....               | 286        |
| 9.3.3 采煤对河川径流影响初步分析 .....               | 289        |
| 9.4 河源区径流变化原因 .....                     | 297        |
| 9.5 小结 .....                            | 298        |
| 参考文献 .....                              | 298        |
| <b>第 10 章 近年水沙锐减原因综合分析</b> .....        | <b>300</b> |
| 10.1 近年黄河来沙锐减原因 .....                   | 300        |
| 10.2 变化环境下黄土高原的产沙格局 .....               | 303        |
| 10.3 近年天然径流偏少原因 .....                   | 305        |
| 10.4 变化环境下黄土高原蓝水/绿水格局 .....             | 308        |
| 10.4.1 遥感驱动的植被耗水过程模型 .....              | 308        |
| 10.4.2 1982 年以来河龙区间绿水和蓝水格局变化 .....      | 311        |
| 参考文献 .....                              | 313        |
| <b>第 11 章 未来黄河水沙情势展望</b> .....          | <b>314</b> |
| 11.1 林草植被发展趋势初步分析 .....                 | 314        |
| 11.1.1 黄土高原植被类型区划及植被演替特征 .....          | 314        |
| 11.1.2 黄河主要产沙区林草植被发展趋势预测 .....          | 319        |



|        |                              |     |
|--------|------------------------------|-----|
| 11.2   | 梯田发展趋势调查.....                | 321 |
| 11.3   | 未来降雨情景分析.....                | 323 |
| 11.4   | 黄河水沙变化趋势初步分析.....            | 324 |
| 11.5   | 变化水沙情势下黄河供水和下游冲淤形势.....      | 327 |
| 11.5.1 | 黄河水资源供需形势.....               | 327 |
| 11.5.2 | 黄河下游河道冲淤形势.....              | 328 |
|        | 参考文献 .....                   | 331 |
| 第 12 章 | 极端降雨情况下黄河可能来沙量初步分析.....      | 333 |
| 12.1   | 未来极端降雨情景分析.....              | 333 |
| 12.2   | 主要产沙区普降大暴雨情况下的可能产沙量.....     | 333 |
| 12.3   | 1933 年黄河特大来沙年的启示.....        | 336 |
| 12.4   | 黄河最大可能来沙量综合分析.....           | 339 |
|        | 参考文献 .....                   | 340 |
| 附件     | 近年典型场次大暴雨的产洪产沙调查.....        | 341 |
| 1      | “2010-09-19” 河龙区间中部大暴雨 ..... | 341 |
| 2      | “2012-07-21” 河龙区间北部大暴雨 ..... | 343 |
| 3      | “2012-07-27” 河龙区间中部大暴雨 ..... | 348 |
| 4      | 泾河西南部 2010 年和 2013 年大暴雨..... | 352 |
| 5      | 2013 年 7 月黄河中游长历时暴雨.....     | 353 |
| 6      | 下垫面要素抵御暴雨能力调查.....           | 356 |
| 7      | 近年暴雨调查得到的启示.....             | 360 |
| 附表     | .....                        | 361 |



# 第1章 绪 论

黄河是中国第二大河,全长 5464km、流域面积 79.5 万  $\text{km}^2$  (含内流区 4.2 万  $\text{km}^2$ ),流经青、川、甘、宁、蒙、晋、陕、豫、鲁 9 省(自治区),在山东省垦利县注入渤海,其水系分布见附图 1。流域地势西高东低,大致分为三个台阶,第一个台阶是西部的青藏高原,海拔 3000m 以上,该区水土流失轻微,是黄河径流的主要来源区;第二个台阶是中部的黄土高原,海拔 1000~2000m,该区大部水土流失严重,是黄河泥沙的主要来源区;第三个台阶由黄河下游冲积平原和鲁中丘陵组成,该区的产流产沙对黄河的水沙贡献很小。

黄河也是一条多灾害河流,历史上曾给中国人民带来深重灾难,因此,治理黄河历来是中华民族安民兴邦的大事。1949 年以来,国家更是对黄河堤防和水库建设、水沙测报和骨干水库水沙调控等方面投入了大量人力和财力,以应对河床淤积和洪水威胁。“沙多、水少”是导致黄河洪灾深重的症结,其多年平均来沙量 16 亿 t、汛期平均含沙量  $60\text{kg}/\text{m}^3$  (陕县,1919~1959 年),居世界江河之首;多年平均径流量只有 559 亿  $\text{m}^3$  (花园口,1919~1975 年),是长江的 1/17。

20 世纪 80 年代以来,黄河水沙逐渐减少。2000~2015 年,潼关年均输沙量和汛期含沙量分别只有 2.74 亿 t 和  $23.6\text{kg}/\text{m}^3$ ,分别减少 83%和 61%;花园口断面天然径流量只有 452 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。黄河水沙情势是治黄方略确定、水沙调控工程布局和水资源配置的基础,因此,黄河水沙近年出现的锐减现象引起了人们的高度关注,其核心关切是:导致黄河水沙近年锐减的主要原因是什么?未来黄河水沙变化的趋势是什么?

2011 年以来,在国家“十二五”科技支撑计划和黄河水利委员会专项研究经费的支持下,我们采用实测数据分析、遥感调查、实地调查和数值模拟等研究手段,分析了近年降雨变化及其对黄河水沙的影响,调查核实了水库、淤地坝、林草植被和梯田等下垫面因素的变化与现状,定量计算了非降雨因素及其主要下垫面因素对黄河水沙减少的贡献,基本查清了黄河近年水沙减少的原因。本书为该项研究成果的总结。

## 1.1 研究范围与研究对象

如图 1.1 所示,本次研究将黄河花园口以上(73 万  $\text{km}^2$ )作为径流变化原因分析范围,该区来水占黄河流域的 96%;将黄河唐乃亥至潼关区间(56 万  $\text{km}^2$ )作为来沙变化的原因分析范围,并重点关注黄河主要产沙区(图 1.2),包括黄河河口镇—龙门区间、渭河咸阳以上、泾河张家山以上、北洛河淤头以上、汾河兰村以上、十大孔兑、清水河同心以上和祖厉河流域,面积 22.6 万  $\text{km}^2$ ,该区贡献了黄河潼关以上 90%的产沙量。

近年径流减少原因的分析对象为黄河干支流主要断面的天然径流量,其计算口径与《黄河水资源公报》一致,即“天然径流量=实测径流量+地表耗水还原量+水库蓄变量”。