

引黄灌区 泥沙承载力和高效配置 关键技术研究

胡健 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

引黄灌区 泥沙承载力和高效配置 关键技术研究

胡健 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内容提要

本书是在国家自然科学基金项目“引黄灌区泥沙的承载力与高效配置关键技术的研究”(基金号: 50909103)的基础上,吸收了簸箕李灌区、位山灌区、小开河灌区等多个灌区泥沙研究项目的成果总结而成。全书围绕引黄灌区泥沙的承载力,提出并构建了灌区泥沙承载力的评价指标系统、量化方法和制约因素;分析总结引黄灌溉的水沙配置模式,从水沙优化调度、沉沙池动态调控、沉沙池的输沙通道改道和渠首断面的优化技术等几个方面,探索了引黄泥沙高效配置技术;采用一维水沙运动数学模型和优化配置模型,研究位山灌区沉沙池输沙通道改造与水沙优化调度对泥沙分布的影响,探讨输沙干渠和沉沙池承载力的上下约束条件,提出了改善位山灌区泥沙承载力的合理对策与方向。

本书可供从事泥沙运动力学、引黄灌溉工程等方面的科研、设计和管理运行等科技人员及大专院校相关专业的师生参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

引黄灌区泥沙承载力和高效配置关键技术研究 / 胡健著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5170-2887-1

I. ①引… II. ①胡… III. ①黄河—灌区—河流泥沙—研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第017246号

书 名	引黄灌区泥沙承载力与高效配置关键技术研究
作 者	胡健 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	北京三原色工作室
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8印张 157千字
版 次	2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷
定 价	28.00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

前 言

随着科学技术和社会经济的飞速发展,人口、资源和环境等问题已成为 21 世纪人类面临的重大挑战,人口膨胀、经济发展和水资源的不合理开发利用带来了严重的水资源危机。我国黄河流域大部分地区属干旱半干旱地区,水资源紧缺问题尤为突出,严重影响沿黄地区社会经济的可持续发展。引黄灌区渠系是调整优化沿黄地区水资源分布与开发利用的重要通道,除了承担沿黄地区工农业生产、生活的供水任务外,还肩负着引黄济津、引黄入卫、引黄济青等跨流域调水任务,是沿黄地区乃至华北地区国民经济发展的生命线。

引黄灌区泥沙的处理利用问题是制约引黄水资源开发利用得以持续发展与发挥长期效益的关键所在。多年以来,黄河下游灌区引黄泥沙淤积分布不合理,渠首淤积的泥沙已大量占压耕地并引发环境问题,传统渠首沉沙和以挖待沉的处理方式已经难以长期维持。优化配置与合理利用灌区泥沙是缓解灌区泥沙问题、保障灌区长期安全运行的基本思路,研究灌区泥沙对生态环境和社会经济发展的承载能力,探索灌区泥沙的高效输送技术,是实现这一目标的关键环节之一。进入 21 世纪以来,小浪底水库蓄水拦沙作用改变了下游河道的水沙条件,灌区引水引沙条件发生了重大的变化,引黄灌区面临新的机遇与挑战。近年来,全国大中型灌区陆续开展了灌区续建配套与节水改造建设,为实现灌区泥沙优化配置提供了不可多得的良机和基本条件支持。在新的形势下,灌区泥沙的承载力问题和高效输沙关键技术的研究开拓了泥沙与环境的关系研究新领域,具有重要的理论意义与学科价值。同时,为研究引黄灌区泥沙的优化配置和合理利用提供参照,有助于减轻引黄泥沙带来的经济负担和生态环境问题,对于保持引黄灌区经济长期稳定发展有着重要的现实意义。

本书得到了国家自然科学基金“引黄灌区泥沙的承载力与高效配置

关键技术的研究”(50909103)项目的资助。多年来,作者承担或参加的科技部科研院所社会公益研究专项“引黄灌区水沙配置理论与关键技术的研究”(2004DIB4J169),水利部创新项目“灌区渠道输沙模型及引黄灌溉对策研究”(SCX-2000-06)、“位山灌区水沙优化调度研究”(SCXC2007-02)、“小开河引黄灌区泥沙长距离输送与优化配置研究与实践”等灌区泥沙的研究项目,所取得的成果为本书的编写提供了宝贵的素材。

本书在撰写过程中,得到了曹文洪所长的大力帮助与衷恳指导,在此表示感谢。灌区泥沙的研究工作是与中国水利水电科学研究院泥沙所江河室同事戴清、史红玲、邓安军、张治昊、袁玉平共同完成的。位山灌区管理处许晓华、连维强、李春涛、姜海波、张传刚,小开河引黄灌区管理局王景元、傅建国、庞启航,簸箕李灌区王云辉、房本岩,为研究工作的顺利开展提供了丰富的资料和有力的支持,非常感谢他们为此付出的劳动与心血。

特别要感谢蒋如琴教授在灌区泥沙研究工作中给予的无私帮助。她虽然已经退休十多年,却从未放弃灌区泥沙的研究工作,始终战斗在灌区泥沙科研工作的第一线。正是从像她这样的众多泥沙所老专家们身上,看到了老一辈科研工作者严谨踏实的工作作风、求新求变的创新意识和终身为科学研究事业的奉献精神,这笔宝贵的精神财富让我受益终身。

最后,感谢妻子陈靖博士及我的家人在工作和生活上对我的支持与鼓励。

限于作者水平,加上成书的时间仓促,难免出现欠妥或谬误之处,敬请批评指正。

胡健

2014年8月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 灌区泥沙研究现状	3
1.3 研究内容与成果	7
第 2 章 引黄灌区的泥沙处理与资源化利用	12
2.1 引黄灌区泥沙问题	12
2.2 引黄泥沙的资源利用现状	18
2.3 引黄灌区面临的机遇与挑战	19
第 3 章 灌区的泥沙承载力	25
3.1 灌区泥沙承载力指标的确定	25
3.2 灌区泥沙承载力的量化方法	27
3.3 灌区引水引沙能力	30
3.4 渠系分水分沙能力	33
3.5 渠道的输水输沙能力	35
3.6 输沉区泥沙调控能力	43
3.7 区域堆沙容纳能力	47
3.8 泥沙资源化利用能力	50
第 4 章 引黄灌区泥沙的高效配置模式与关键技术	53
4.1 引黄灌溉模式	53
4.2 泥沙配置模式	54
4.3 水沙优化调度	60
4.4 沉沙池的动态调控运行	62
4.5 沉沙池的输沙通道技术	63
4.6 渠道优化技术	68
4.7 堆沙区的沙化土地治理	73
第 5 章 位山灌区泥沙承载力评价	75
5.1 位山灌区概况	75
5.2 位山灌区的泥沙问题	78
5.3 位山灌区泥沙承载力评价	82

第 6 章 位山灌区水沙运动数学模型86

6.1 一维水沙运动基本方程86

6.2 数学模型的求解87

6.3 模型的率定与验证93

6.4 方案计算97

第 7 章 位山灌区水沙优化配置评价 106

7.1 水沙优化配置数学模型的构建 106

7.2 多目标优化配置的层次分析结构 107

7.3 分配单元权重的确定 109

7.4 位山灌区泥沙优化配置的约束条件 113

7.5 位山引黄灌区水沙资源优化配置评价 113

参考文献 115

第1章 绪 论

1.1 研 究 背 景

黄河下游引黄灌区是我国规模最大的连片自流灌区,覆盖山东、河南两省 17 个市(地),60 多个县(市、区),涉及总土地面积 500.2 万 hm^2 ,设计灌溉面积 343 万 hm^2 ,有效灌溉面积 223.4 万 hm^2 ,受益人口达 5271 万人。自新中国成立以来,沿黄地区开展水沙资源利用,发展引黄灌溉事业,同时利用黄河泥沙资源进行低洼盐碱地的沉沙淤积、改良土壤,彻底改变了灌区农业生产落后的面貌,促进地区农业与社会经济的繁荣发展,灌区已成为重要的粮棉生产基地。

随着引黄灌区的工农业生产的发展,灌区对水资源的依赖性越来越大,黄河是一条多沙河流,引水必然引沙,引黄泥沙问题已成为制约引黄水资源开发利用得以持续发展与发挥长期效益的关键所在。2009 年初,由于降水异常偏少和平均气温较常年同期偏高导致河北南部、山西东南部、河南西南部等地持续干旱,对我国北方小麦主产区的小麦生长造成严重的影响,为此国家防汛抗旱总指挥部首次启动 I 级抗旱应急响应。这场大旱暴露出部分灌区渠系年久失修和农田灌溉设施缺乏的问题,其中末级渠系泥沙淤积是导致农田灌溉系统难以引水入田的重要原因之一。

由于沿黄两岸自流沉沙条件较好,利用渠首沉沙池集中沉沙是长期以来引黄泥沙处理的主要方式。在经过 50 多年的运用后,黄河两侧适宜用作沉沙池的低洼盐碱地几乎用尽,失去了自流集中沉沙的条件,清淤泥沙在沉沙池和输沙渠两侧堆积,随着清淤量的累积性增加,已达到不可持续的状态,清淤泥沙占压耕地、渠首土地沙化、生态环境恶化等问题越来越严重,对灌区社会经济、生产生活和生态环境造成越来越大的负面影响。

当前灌区泥沙危害主要有以下几个方面:

(1) 可用沉沙征地越来越少,淤积泥沙处理日趋困难。在经过几十年的运用后,渠首集中沉沙的处理泥沙方式已经受到不同程度的限制,原开辟的沉沙池已淤满,再无荒地可开发。河南、山东两省自引黄以来至 2000 年,沉沙池面积设计容积 55159 万 m^3 ,已经使用了 42603 万 m^3 ,占全部容积的 76.3%。由沉沙池沉沙改为以挖代沉的输沙渠,渠首两侧泥沙堆积,难于继续维持这种局面。长期的沉沙占地使渠首地区可用作沉沙池的低洼地越来越少,自流沉沙条件日渐困难。引黄泥沙在渠道中的淤积主要依靠人工清淤的办法解决,消耗大量的

人力、物力,灌区清淤工作加重群众负担,农民收益减少。灌区泥沙处理费用已占至灌区年运行引用的60%~70%,并且呈现出逐渐增加的趋势。按山东水科院对引黄泥沙处理费用的研究统计,黄河下游每年清淤负担约占农民灌溉净增收益的8.5%。

(2) 占用耕地,局部土壤沙化,灌区生态环境恶化。沉沙和清淤占用大量土地,大量堆积在渠首泥沙形成带状沙区,造成周围土地沙化和环境问题,局部地区土壤沙化严重,土壤肥力降低,清淤弃土基本不能种植作物。黄河下游土地沙化面积达3万 hm^2 以上,风沙侵害面积达10万 hm^2 以上,严重威胁当地的农业生产生活。如簸箕李灌区渠首两侧各一公里范围内沙尘暴现象不断发生,春季飞沙可将的庄稼苗埋没,沙渠首地区人民群众的人均粮食产量与收入仅为中下游地区的一半左右。

(3) 加重排水河道淤积,降低河道的行洪排涝能力。渠道引黄退沙加重排水河道的泥沙负担,不少灌区因泥沙处理费用问题被迫实行浑水入渠,大量淤积造成排水河道的行洪排涝输水能力下降。加之渠道长年输水、工程老化,渠道向周围地区渗水严重,造成地下水位抬高,部分地区次生盐碱化面积大幅增加,粮棉大幅度减产。对比灌区渠系中的泥沙处理,排水河道中的泥沙清淤难度大,费用更高。

引黄灌区泥沙具有灾害性与资源性的双重属性,引黄泥沙中的细颗粒具有改良土壤结构、增加土壤肥力的功能,淤积泥沙可用于住宅地基垫土和加工成建筑材料。解决灌区泥沙问题的出路在于合理安排泥沙在灌区内的分布。如何合理地处理利用引黄泥沙,减小引黄泥沙带来的经济负担和生态环境问题,成为引黄灌区经济长期稳定发展重要条件。

泥沙合理调配是实现灌区水资源优化配置的重要环节之一,泥沙从产生、搬运到沉积的整个过程是在水流动力的作用下完成的,水流输沙在泥沙的输运过程中发挥了重要的作用,两者是密不可分的一个整体。泥沙的分布与水资源配置密切相关,在水资源的配置过程中若不考虑泥沙的配置是不全面、不可持续的。因此,在水资源配置中就考虑灌区泥沙的承载力,将水沙资源共同配置,实现资源配置效益最大化。

灌区泥沙承载力主要研究灌区泥沙资源与社会发展、生态环境的泥沙需求之间的平衡关系,是灌区泥沙优化配置理论的重要组成部分。而泥沙高效配置关键技术则是在遵从输沙机理的条件下合理调配泥沙资源、达到优化配置的重要手段。本研究从灌区泥沙的资源性与灾害性的角度出发,深入认识泥沙的致灾机理与资源属性,弥补了灌区泥沙承载力评价计算方面的空白,将扩展泥沙动力学和泥沙工程学的研究内容,对于推动泥沙运动力学与资源学、环境学等多学科的融合发展也具有重要的意义。

灌区泥沙承载力研究是灌区水沙资源多目标优化配置的基础,从泥沙承载力角度研究区域泥沙资源-生态-环境问题,可作为评价引黄灌区可持续发展能力基础支持系统的方法之一。研究方向是国家中长期科学和技术发展规划纲要优先主题(水资源优化配置与综合开发利用)的重要组成部分,同时也是国家重点基础研究发展计划的重要支持方向(农业领域资源高效利用的基础研究),适应我国水利科技发展的需求,具有较高的科学意义。

近年来引黄灌区开始进行大规模的节水改造建设,工程总投资额达 200 多亿,结合节水改造建设改善渠道的输水输沙能力,是解决当前泥沙处理利用问题的一个不可多得的好机会。本项研究配合黄河下游成片灌区节水改造建设,合理地配置与利用引黄泥沙资源,减小引黄泥沙带来的经济负担和生态环境问题,保持引黄灌区经济长期稳定发展,建立黄河下游和谐社会和发展社会主义新农村,具有较高的应用价值和社会经济效益。

因此,开展引黄灌区泥沙的承载力及高效配置关键技术的研究是灌区节水改造、实现水资源在优化配置迫切需要解决的重大科学技术问题,其成果能为引黄灌区的水沙联合配置工作提供指导作用,为引黄灌溉事业的可持续发展的宏观决策提供重要的科学依据,具有一定的实际应用价值。

1.2 灌区泥沙研究现状

引水灌溉在国内外都有较长期的发展历史,引水灌溉发展也十分迅速,水资源配置的理论与技术都有较高的发展水平,逐步满足按需配置的灌溉要求。国外大部分灌区不存在严重的渠系泥沙淤积问题,即使有较大含沙量的引水灌溉,引水时间也是短暂的,不会构成对引水灌溉的威胁,灌溉配水模式仅能适用于清水或者低含沙水流的引水灌区。因此,有关灌区进行泥沙配置利用的研究非常少,没有系统的泥沙配置与环境控制措施可以借鉴。

1.2.1 引黄灌区泥沙问题的研究现状

引黄泥沙处理问题是一个十分重要的研究课题,也是一个比较难的问题。我国早在北宋时期有了引黄河水淤灌农田的记载,民国年间也曾建过虹吸引水工程,但规模和时间都较短。新中国成立之后,引黄灌溉事业进入蓬勃发展的高峰期,期间历经初办、大办、停灌、复灌、稳固发展和科学引黄发展几个阶段。经过 50 多年的引黄灌溉,灌区已成为重要的粮棉生产基地,彻底改变了灌区农业生产落后、人民生活贫困的面貌,促进了地区工农业与社会经济的繁荣发展。

灌区泥沙问题的研究与引黄灌溉事业和灌区社会生产发展密不可分^[1-4]。20 世纪 50 年代,开始对引黄渠首工程、放淤改土进行科学研究与实践,以较大力量

投入到渠道水流挟沙能力的研究上。60年代和70年代转向渠系防淤综合措施的探讨上,发展了沉沙处理与输送技术,对引洪浑水淤灌,高含沙水流的挟沙能力、渠道输沙及冲淤规律进行了研究。80年代对灌区泥沙利用方面有了较大的发展。90年代对灌区进行了大规模的国家攻关研究,将引黄灌区泥沙问题列入国家八五攻关计划,研究引黄泥沙的淤积分布现状及其发展趋势,全面总结了40年来引黄泥沙处理利用的经验和教训,分析引黄灌溉放淤、稻改、淤背、固堤等泥沙利用带来的巨大经济、社会和生态效应,对清淤泥沙占压土地、渠首沙化和引黄泥沙淤积排水河道带来的负面影响也作了专门的研究;通过对典型灌区水沙泥沙的长期观测资料,深入研究了灌区水流泥沙运动的规律,建立了引黄灌区渠网水沙调度的数学模型,论述了不同类型的优化黄河下游灌区泥沙平面分布的处理与利用模式。90年代后期,对泥沙长距离输送问题进行了探索与实践。

灌区泥沙问题的根源在于淤积分布的不合理和淤积物粗细搭配的失调,沉沙池与干渠淤积比例过多,由于过多依赖渠首沉沙作用,沉沙池和干渠淤积泥沙除了较粗颗粒泥沙外也将大量富含养分的黏性细颗粒沉积下来。这部分泥沙平均粒径粗,沉沙池和干渠水流中 $d>0.05\text{mm}$ 的粗颗粒含量较多,往往渠首和干渠附近泥沙堆积在渠道两侧,大量占用耕地,而且堆积物的水分涵养能力差,不适宜作物生长,易造成土地沙化,引起生态环境恶化。目前,灌区发起大规模节水改造建设,结合引黄灌区水沙矛盾日益突出问题,关于水沙资源的联合优化配置开始列为重点研究的方向。

1.2.2 泥沙资源配置研究

在泥沙的运动输移过程中,时刻都离不开水,泥沙资源配置与水资源配置密切相关,因此研究时常常从水沙资源联合配置出发。引黄灌区水沙联合优化配置的研究成果目前较少,有很大技术难题并未解决。关于泥沙资源优化配置的研究尚处于起步阶段,刚在理论概念上提出水沙资源联合优化配置,真正意义上的优化配置理论体系尚未形成。

国内外关于水资源配置的研究成果丰富,已经形成了一套较完整的配置理论和方法^[5-8]。最早的研究起始于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题,50年代以后,随着系统分析理论和优化技术的引入以及60年代计算机技术的发展,国外水资源系统模拟模型技术得以迅速研究和应用。1979年,美国麻省理工学院(MIT)完成的阿根廷河Rio Colorado流域的水资源开发规划,以模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究,并提出了多目标规划理论、水资源规划的数学模型方法。

我国的水资源配置工作起始于20世纪60年代的关于水库优化调度的水资源分配研究。自20世纪80年代开始,由于水资源规划管理的需要,采用系统优化

和模拟进行水资源配置的研究逐渐受到重视。80年代后期提出关于水资源的合理配置及其承载力的研究,逐渐在水资源优化配置的基本概念、优化目标、基本平衡关系、需求管理、供水管理、水质管理经济机制、决策机制及各主要模型的数学描述等方面均有新的研究成果。90年代后期,提出了基于宏观经济的多层次、多目标、群决策方法的水资源优化配置理论,开发出了宏观经济水资源优化配置模型,经广泛应用取得了较大的经济和社会效益。

泥沙的资源化及其配置理论是近年来在国内逐渐形成并提出的新理念,关于灌区水沙资源的联合优化配置研究于近几年才开始进行,目前仍处于理论概念的提出阶段。而国外与泥沙资源配置相关研究很少,其成果仅限于有关泥沙利用的研究,如引浑水灌溉、利用泥沙资源治理河流侵蚀等。M.R.Pearl 和 D.E.Walling^[9]利用位于英国德文郡的河流的泥沙资源,用直接和间接两种方法,分析不同水位、季节的泥沙资源中炭、磷、氮等各个成分的比例,为泥沙资源的不同应用提供依据。Misganaw DEMISSIE^[10]研究美国伊利诺斯州河流的侵蚀和泥沙,通过全面的管理分配泥沙资源,利用泥沙资源治理河流侵蚀。J. Knight, S. G. McCarron, A. M. McCabe and B. Sutton 把泥沙作为一种风景资源,估计北爱尔兰的泥沙资源在空间的分配,利用其地方性的数据在不同的风景属性的地方,进行造园工程和实施管理策略等。挪威的 H.斯托尔通过研究水库中的水资源和泥沙资源,利用水库中的水发电,水库中的泥沙作为建筑材料。

由于泥沙问题相对突出,在国际上泥沙资源配置方面的研究我国一直处于领先地位。水沙资源配置的思想最早是针对水沙矛盾突出的黄河流域提出的,钱宁等 1978 年针对黄河治理开发中的泥沙问题,提出采用多种措施来综合处理利用黄河的泥沙,逐步形成了“拦、排、调、放、挖”的综合治沙方略^[11]。20 世纪 90 年代,陆续出现了关于水库泥沙综合调节与优化调度方面的研究,可以算作有关水沙联合优化配置的雏形。张运新等^[12]、杜殿勋等^[13]、刘素一等^[14]、彭杨等^[15]和孙昭华^[16]研究中采用水沙联调的多目标规划理论与模型,对水库水沙综合优化调度运用进行了研究。

泥沙的资源化及其配置理论是近年来才被明确提出的。胡春宏 2001 年提出在江河治理中将泥沙资源与水资源共同优化配置的概念^[17];李义天等 2002 年分析了河流泥沙资源化的必要性与开发利用措施^[18];胡春宏、王延贵等^[19-22]探讨了流域泥沙资源配置系统与社会经济、生态环境以及水资源系统的关系,提出了泥沙资源配置的原则、任务和原理,给出了流域泥沙资源优化配置的理论框架。以自然资源的概念与属性为基础,对流域泥沙的资源化及其实现途径作了相关研究。陈绪坚 2005 年提出了以改善河道输水输沙能力和维持河道稳定为基础的水沙资源联合多目标优化配置理论,并应用于黄河下游综合治理中^[23]。

引黄灌区水沙资源优化配置的工作近年来刚刚开展,中国水利水电科学研究

院 2005 年开始对引黄灌区水沙配置理论与关键技术进行研究,在水沙资源多目标优化配置方面已取得初步成果。王艳华 2007 年针对引黄灌区水沙资源利用的现状,提出水沙资源多目标优化配置的理论,构造了优化配置综合目标函数,研究了确定各配置约束条件的方法,建立优化配置数学模型并在典型灌区作了初步的应用。

1.2.3 承载力概念的演化与发展过程

“承载力”最初是指物理力学中物体在不产生任何破坏时的极限负荷,通常具有力的量纲。经不同领域的借用与外延发展,逐渐演变为描述区域系统对外部环境变化的最大承受能力。随着区域研究的深入,承载力被发展成现代的承载能力,成为用以描述区域发展受限制程度的最常用的概念。

承载力早期应用范围只限于生态学领域,表述在特定时间内特定生态系统所能支持的最大种群数量。随着工业经济的迅速发展,资源与环境问题越来越突出,研究者将承载力概念延伸至资源、环境、经济、人口、社会协调发展的研究领域,承载力概念的意义也发生了相应变化,承载力一词也总是与生态破坏、环境退化、资源减少、人口增加、经济发展等相联系在一起,阐述区域系统对发展和特定活动的承受能力。特别是面对日益严重的资源短缺问题,人们开始使用资源承载力的概念重新评估全球各类资源的限制及对经济活动与发展的承受限度,如土地资源承载力、水资源承载力、环境承载力等^[24]。

早在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初,由美国麻省理工学院的 D. 梅多斯等学者组成的“罗马俱乐部”,就利用系统动力学模型对世界范围内的资源(包括土地、水、粮食、矿产等)环境与人的关系进行评价,构建了著名的“世界模型”,深入分析了人口增长、经济发展同资源过度消耗、环境恶化和粮食生产的关系,并预测到 21 世纪中叶全球经济增长将达到极限。为避免世界经济社会出现严重衰退,提出了经济的“零增长”发展模式^[25]。英国的 SLesser 提出采用 ECCO(Enhancement of Carrying Capacity Option)模型作为新的资源环境承载力的计算方法,该模型在“一切都是能量”的假设前提下,综合考虑人口—资源—环境—发展之间的相互关系,以能量为折算标准,建立系统动力学模型,模拟不同发展策略下,人口与资源环境承载力之间的弹性关系,从而确定以长远发展为目标区域发展优选方案^[26]。

目前承载力理论不太成熟,但承载力研究已从最初的定性静态分析走向动态模拟与预测^[27-29],系统动力学模型、灰色系统模型、模糊目标规划模型、回归预测模型、层次分析模型等在承载力的动态研究中得了广泛应用。静态研究方法主要是估算承载力的上限值,以大量的实际获得的单因子数据为依据,把人口作为外生变量,不考虑人口对农业生产的反馈作用和集约化农业所要求的投入水平,所得结果有一

定的参考价值,且所用资料少,计算方便易行,但是无法反映承载力随时间的变动情况,极大限制了这些方法的应用范围,很快被动态研究方法取代。

泥沙资源的供给与水资源配置、社会经济发展、生态环境的泥沙需求之间是一种供需关系,泥沙资源与水资源的配置之间存在一定的平衡。因此,灌区不同区域的水资源利用、社会经济发展、生态环境等因素对泥沙存在一个最大的承受能力。如何合理地评价灌区泥沙的承载力尚未有研究成果,灌区常用的泥沙处理与利用技术对改善灌区的泥沙分布究竟有多大的影响无标准可比。

本书从研究灌区泥沙的承载力入手,以社会经济发展和生态环境的可持续发展为目标,建立灌区泥沙承载力的评价方法,探索改善灌区泥沙分布的关键技术,研究灌区对泥沙资源的输运、沉积、利用等作用所能承受的最大容纳能力。

1.3 研究内容与成果

本书研究包括泥沙的承载力与渠系泥沙高效配置关键技术两个部分,前者对灌区泥沙的灾害性与资源性进行研究,构建灌区泥沙的承载力评价指标体系与度量表达式,分析泥沙分布特征与不同区域泥沙承载力的特点,探讨泥沙资源优化配置措施与泥沙承载力的关系,为灌区泥沙优化配置提供理论支持;后者从沉沙池动态调控机理、非均匀沙分组冲淤阈值、泥沙长距离输送机理与输沙用水量三个方面研究渠系泥沙高效配置关键技术,优化配置泥沙资源,为提高优化灌区泥沙承载力提供技术支撑。

1.3.1 研究内容

本书主要包括以下四个方面研究内容:

(1) 引黄灌区泥沙资源的现状调查。采用现场调研、资料分析等方法,掌握灌区水沙分配现状及存在主要问题,分析灌区泥沙淤积分布特性和处理利用情况,从渠系的输水输沙能力的角度研究问题成因。

(2) 灌区泥沙承载力评价指标体系研究。提出影响泥沙承载力的主要因素,包括自然因素和人为因素等,分析各影响因素之间的相互关系。研究泥沙承载力的计算方法,建立基于水沙资源优化配置的承载力综合目标函数,结合不同灌区的泥沙承载力的分布差别及约束条件的差异,通过多目标规划与层次分析等方法分析评价灌区的泥沙承载力。

(3) 泥沙高效配置关键技术研究。研究灌渠泥沙高效配置关键技术,分析泥沙高效配置与提高泥沙承载力的关系,探讨改善泥沙输沙能力、提高泥沙承载力的措施。分析渠道水流对不同粒径泥沙输运、沉积的影响,研究渠段分组沙的冲淤平衡阈值;结合灌区节水灌溉与远距离输水工程,分析泥沙远距离输送的运行

调控机理与效果，探讨最佳的输沙用水量；分析沉沙池动态调控机理，探讨沉沙池内不同粒径泥沙的运动特征与处理方式。

(4) 典型灌区泥沙承载力评价。选择典型灌区研究泥沙资源的分布特征、发展状况及存在问题，总结灌区泥沙的处理与利用经验，探讨灌区泥沙问题的成因与泥沙资源化方向，分析灌区泥沙承载力的分布特性。结合已有的灌区分组沙数学模型，计算各类配置技术对区域泥沙的调整作用，分析对泥沙承载力的影响，验证灌区泥沙承载力评价体系，提出改善泥沙承载力的合理对策。

1.3.2 研究技术路线

本研究基于生态环境学、农田水利、泥沙运动力学、水资源学、社会经济、优化配置理论与水沙联合调度的基本理论和观点，采用现场调查研究、原型观测资料分析、理论探讨和数学模型计算等多种研究方法和手段进行研究。主要思路是通过泥沙承载力主要影响因子的分析，建立引黄灌区泥沙承载力的判别与评价体系，针对灌区实际情况探讨不同泥沙处理利用技术对改善区域泥沙承载力的效果进行分析与评价，分析灌区各个区域对泥沙的供需情况，为减少泥沙灾害、实现泥沙资源合理配置提供方向指导；泥沙高效配置关键技术研究非均匀沙在渠道中的运动、输移、沉积规律，提出改善渠道输沙能力方法与措施，为泥沙资源在灌区的合理优化配置提供有力的技术支撑。两者相互关联形成一个整体，是灌区水沙资源优化配置的重要组成部分，为实现灌区泥沙资源的高效利用服务。

具体技术路线如图 1.1 所示。

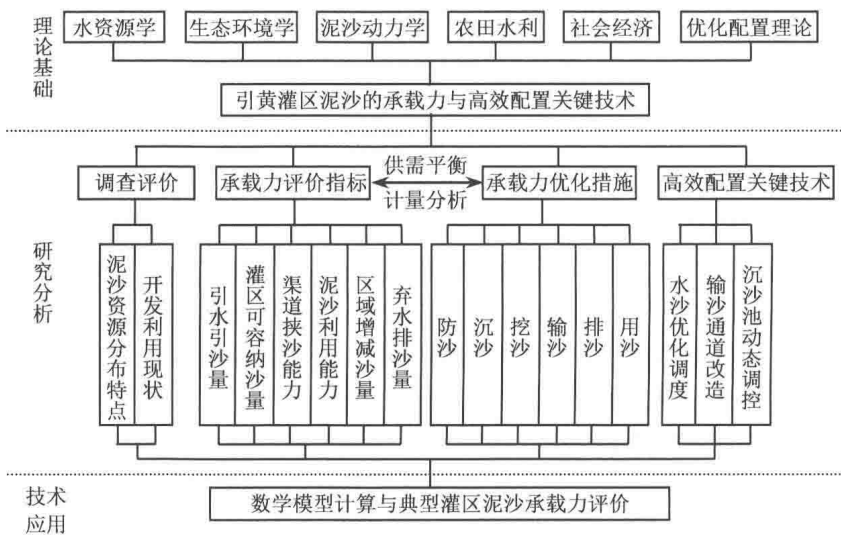


图 1.1 研究技术路线图

1.3.3 研究成果

本研究主要取得了如下四个方面的成果。

(1) 引黄灌区泥沙资源的现状调查。采用现场调研、资料分析等方法,总结灌区水沙分配现状及存在主要问题,分析灌区泥沙淤积分布特性和处理利用现状,分析了小浪底水库运用后引黄灌区新的引水引沙条件,灌区泥沙面临机遇与挑战并存的新形势。

(2) 灌区泥沙承载力评价指标体系研究。分析泥沙承载力的主要影响因素,按其表现形式分类,主要有灌区引水引沙能力、渠系分水分沙能力、渠道输水输沙能力、输沉区泥沙调控能力、区域堆沙容纳能力和泥沙资源化利用沙能力。前四个指标与灌区渠系水沙运动有关,主要受水流泥沙运动机理和冲淤规律的约束与控制;后两个指标则更多地受到灌区社会、经济、生态环境水平的制约。根据承载力表现形式建立评价量化指标,包括灌区引水引沙量、渠系分水分沙量、沉沙区泥沙调控量、渠道输水输沙量、区域堆沙容纳量、泥沙资源化利用量等六大类指标。

总结了承载力指标的三种量化方法和四个量化条件。三种量化分析方法包括综合判别指标法、动态分析法、水沙动力分析与运动模拟方法。四个量化条件有:①渠系沙量平衡条件;②生态维护对象的沙量供需平衡条件;③灌区初始条件,包括灌区现有渠道和控制闸工程对泥沙配置的能力约束;④边界条件,包括渠道改造和水沙调度对泥沙分配的调控能力、灌区渠道输送泥沙能力的上下限,各区域泥沙容纳能力等。

针对泥沙承载力的六个指标分别进行研究分析,探讨各个指标的内在机理、限制因素和阈值条件,结合不同引黄灌区的特点进行了实例分析。

通过研究不同粒径的泥沙在渠道中的输移规律和淤积分布特点,掌握灌区不同来水来沙条件下的泥沙冲淤情况,探索泥沙长距离输送入田等泥沙综合利用技术的实现与应用,从而确定渠系和田间泥沙合理配置,指导灌区采取的有效工程措施和合理运行方式。采用山东簸箕李灌区近20年来的泥沙观测资料,分析悬移质在渠道中的运动、冲淤规律。由于不同粒径的泥沙在水流中运动方式和沉积特点不一样,将非均匀沙按粒径粗细分组,研究了不同粒径泥沙的起动与止动、沉降与悬浮的差异,统计分析了分组沙的输沙能力、沿程衰减规律和上限平衡含沙量。研究表明,粗颗粒泥沙对流量因素敏感,若要使更多的粗颗粒泥沙实现长距离输送,应提高水流流速;细沙对流量因素的敏感度较粗沙小,同时挟沙力随细颗粒含量的增加而明显提高。

总结泥沙处理利用方式和灌区实际经济情况,对比沉沙池覆土还耕技术对土壤改良的作用与经济效益,分析覆土还耕技术的投入产出分析。研究灌区生态环

境与泥沙承载力的关系,分析清淤挖沙堆积对环境的致灾机理与影响程度,建立气象条件与泥沙致灾的关系。计算不同粒径泥沙对风的敏感程度及风沙的起动速度,分析生态环境发生变化时堆沙总量、粒径组成等的泥沙要素特征值与临界条件,分析水土保持措施对提高区域泥沙承载力的作用。

(3) 泥沙高效配置关键技术研究。总结了引黄灌溉模式和泥沙配置方式,分析了“防(沙)、沉(沙)、挖(沙)、输(沙)、排(沙)、用(沙)”六种形式的优化泥沙配置措施。在此基础上,提出当前灌区泥沙高效配置关键技术包括优化水沙调度方式、渠道断面优化、沉沙池动态调控运行、沉沙池输沙通道改造、堆沙区的沙化土地整治等方面,对这些高效配置技术的机理与要点分别进行了研究。

沉沙池动态调控技术是近年来提出的一种泥沙高效配置技术,针对现有灌区渠首沉沙池可用泥沙容量越来越小的情况,将沉沙条渠改造成输沙条渠,沉沙池动态调控技术通过调节渠道的水力要素与来水来沙之间的关系,使之在运行过程中的某一时段处于冲刷状态,将渠道中淤积的泥沙重新冲起并输送至下游渠道,使输沙条渠冲淤平衡或尽量少淤,达到沉沙池仅拦截粒径较粗的泥沙,将更多的细沙通过输沙渠输送至中下游处理的目的,从而有效地减少渠首的清淤负担,降低泥沙处理费用。研究沉沙池动态调控技术的原理,分析沉沙池增加水力比降对水流挟沙力的作用,探讨输沙渠内不同粒径泥沙的运动特征与处理方式。

以位山灌区输沙通道改造为例,重点分析研究了措施实施以来西输沙渠缩窄、西沉沙池输沙通道,特别是西沉沙池输沙通道的作用与效果及其形态特点。由2008年10月至2010年4月的成功实践,表明在输低引水含沙量引水的相当一段时间内采用沉沙池输沙通道运行方式可将绝大部分泥沙经由沉沙池排至下游输水干渠,实现泥沙长距离输送。经对较高和较低引水含沙量条件下沉沙池冲淤特性的分析,研究了位山灌区运行以来不同引水含沙量条件下西沉沙池泥沙冲淤特点,提出了当前较低引水含沙量条件下沉沙池的输沙功能及输沙通道运行方式和未来较高引水含沙量条件下的沉沙池容沙功能及动态调控运行方式。

灌区渠道最优输沙断面形态的研究。来水来沙条件、纵比降与横断面形态是渠道输水输沙能力的重要影响因素,其中横断面形态是受自然条件制约最少的因素。不同断面形式直接影响渠道的输水输沙能力,从断面形态参数出发引入表称流量和表称输沙率研究在给定流量条件下断面河宽、水深与输沙能力的关系,给出了断面表称输沙率新的表达式,分析得到在相同面积和边坡的梯形断面选择宽深比较小的断面形态能够明显提高渠道的输水输沙能力。通过表称流量与表称输沙率公式,分析断面形态与输水输沙的关系,研究不同的边坡系数、宽深比条件下的最优输沙断面形态,给出了提出灌区梯形渠道断面在输沙最优条件的表达式,并采用试算的方法得到了输沙最优梯形断面的宽深比与边坡系数的关系式。以簸箕李灌区的渠道为例,通过试算求解不同底宽、边坡条件下的渠道输沙最优断面,