

HELIU NISHA JUNHENG LILUN
JIQI YINGYONG

河流泥沙均衡理论 及其应用

陈绪坚 著



黄河水利出版社

河流泥沙均衡理论及其应用

陈绪坚 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书通过理论研究、资料分析和数学模型计算,开展河流泥沙均衡理论及其应用研究。河流泥沙均衡理论包括河床演变均衡稳定和泥沙均衡配置相互关联的两个方面,一方面针对河床演变均衡稳定问题,提出了河流最小可用能耗率原理及其表达式,利用该表达式封闭河床演变方程组,建立了河床演变均衡稳定数学模型,计算了黄河下游的均衡稳定断面形态,并分析了黄河下游河道均衡形态变化及水沙调控指标;另一方面针对河流泥沙均衡配置问题,提出了泥沙均衡配置方法,建立了泥沙多目标均衡配置数学模型,应用该数学模型计算了黄河下游的泥沙均衡配置,并提出了黄河下游游滩河段的泥沙均衡配置方案及其综合评价方法。

本书可供从事泥沙运动力学、河床演变、河道治理、工程泥沙、流域泥沙配置与利用等方面研究、规划、设计和管理的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流泥沙均衡理论及其应用/陈绪坚著. —郑州:黄河水利出版社,2017.3

ISBN 978-7-5509-1704-0

I. ①河… II. ①陈… III. ①河流泥沙-研究IV. ①TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第054464号

组稿编辑:李洪良 电话:0371-66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:18.5

字数:320千字

印数:1—1000

版次:2017年3月第1版

印次:2017年3月第1次印刷

定价:80.00元



作者简介

陈绪坚(1967—),男,湖北通山人,高级工程师(教授级),博士,主要从事河流泥沙及河床演变方面的研究工作。1988年获武汉水利电力大学工学学士学位,1996年获武汉水利电力大学工学硕士学位,2005年获中国水利水电科学研究院工学博士学位。先后承担国家大型工程、国家科技支撑计划、国家重点基础发展规划以及国家自然科学基金等科研项目20多项,先后4次获得大禹水利科学技术一等奖,出版专著1本,发表论文30余篇。

前 言

冲积河流河床演变研究有个基本理论问题:如何在数学上完整表达河床演变的基本原理——自动调整作用原理,这个问题也导致河床演变方程组在理论上是不封闭的。长期以来,国内外学者对河床演变基本理论问题进行了不懈的探索和研究,本书试图运用河床演变均衡稳定理论来回答该问题。

河槽淤积萎缩、“二级悬河”形成、水库迅速淤积、河道剧烈冲刷或淤积、河口快速淤伸或蚀退等都是河流泥沙分布不均衡的表现形式,河流输送适量泥沙对维护河道均衡稳定和生态环境健康起着重要作用。近些年来,由于自然气候条件的变化和人类活动的影响,我国很多河流的水沙条件出现明显变化,特别是大型水利工程建设,显著改变了河流泥沙的时空分布,出现水库泥沙淤积、水库下游河槽冲刷、河口三角洲退蚀的现象。因此,河流泥沙均衡配置理论进一步探讨河流泥沙合理配置问题。

本书共分为10章,第1章介绍了研究背景和研究进展及理论基础;第2章论述了河床演变均衡稳定理论;第3章建立了河床演变均衡稳定数学模型;第4章开展了黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算;第5章分析了黄河下游河道均衡形态变化;第6章介绍了河流泥沙均衡配置方法和模型;第7章建立了黄河下游泥沙均衡配置数学模型;第8章进行了黄河下游泥沙均衡配置方案计算及其评价;第9章提出了黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置方法;第10章为黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置方案。

本书是作者近十年来关于河流泥沙均衡理论方面研究成果的汇总,其中河床演变均衡稳定理论的部分章节内容摘自作者的博士论文“流域水沙资源优化配置理论和数学模型”,并做了补充修改,该论文得到了胡春宏院士的悉心指导,在此深表感谢!河流泥沙均衡配置理论的部分章节摘自“十二五”国家科技支撑计划项目专题“黄河下游滩槽水沙优化配置与宽滩区运用方式研究”报告

的相关内容。

由于本书研究内容涉及水沙变化、河床演变、工程泥沙、河道治理等多个方面,限于作者水平,书中欠妥和疏漏之处在所难免,真诚欢迎读者批评指正。

作 者

2016年8月8日于北京

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 河流泥沙均衡配置研究进展	(4)
1.3 河床演变均衡稳定研究进展	(7)
1.4 河床演变均衡稳定理论基础	(11)
参考文献	(17)
第 2 章 河床演变均衡稳定理论	(23)
2.1 河床演变基本原理	(23)
2.2 河流熵概念	(24)
2.3 明渠流均衡稳定理论	(27)
2.4 冲积河流河床演变均衡稳定理论	(30)
2.5 小 结	(36)
参考文献	(37)
第 3 章 河床演变均衡稳定数学模型	(39)
3.1 河床演变均衡稳定数学模型方程	(39)
3.2 河床演变均衡稳定数学模型计算验证	(44)
3.3 小 结	(49)
参考文献	(50)
第 4 章 黄河下游河床演变均衡稳定数学模型计算	(51)
4.1 计算水沙条件及河道边界条件	(51)
4.2 河床演变均衡稳定计算和分析	(59)
4.3 维持黄河下游河槽均衡稳定及泥沙均衡分布	(80)

4.4 小 结	(83)
参考文献	(84)
第 5 章 黄河下游河道均衡形态变化	(86)
5.1 黄河下游河型和冲淤变化	(86)
5.2 黄河下游主河槽弯曲形态变化	(94)
5.3 黄河下游河槽萎缩变化	(99)
5.4 维持黄河下游均衡稳定河槽的规模和措施	(109)
5.5 小 结	(119)
参考文献	(120)
第 6 章 河流泥沙均衡配置方法和模型	(122)
6.1 河流泥沙均衡配置方法	(122)
6.2 河流泥沙均衡配置数学模型	(126)
6.3 小 结	(133)
参考文献	(133)
第 7 章 黄河下游泥沙均衡配置数学模型	(135)
7.1 黄河下游泥沙配置层次分析	(135)
7.2 构造综合目标函数	(139)
7.3 确定配置约束条件	(153)
7.4 小 结	(174)
参考文献	(176)
第 8 章 黄河下游泥沙均衡配置方案及其评价	(179)
8.1 黄河下游水沙空间分布和水沙条件分析	(179)
8.2 黄河下游泥沙均衡配置方案	(186)
8.3 黄河下游泥沙均衡配置效果评价	(196)
8.4 小 结	(204)
参考文献	(205)
第 9 章 黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置方法	(206)
9.1 黄河下游宽滩区概况及配置河段	(206)

9.2	黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置层次分析	(209)
9.3	黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置数学模型	(220)
9.4	小 结	(232)
	参考文献	(233)
第 10 章	黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置方案	(235)
10.1	计算配置方案组合	(235)
10.2	泥沙配置方案计算	(238)
10.3	综合评价方法	(261)
10.4	建议配置方案	(272)
10.5	小 结	(283)
	参考文献	(284)

第1章 绪论

长江和黄河等大江大河的水沙条件出现显著变化,对河流泥沙分布及河床演变的影响逐步显现,本章介绍河流泥沙均衡配置及河床演变均衡稳定的有关研究进展,并介绍河床演变均衡稳定的理论基础,包括热力学熵和统计熵理论及耗散结构理论。

1.1 研究背景

由于气候干燥少雨、地质地貌条件变化、森林植被减少和人类活动频繁等因素的影响,许多流域的水土流失严重,产生大量的泥沙。据估算^[1,2],全球大陆地表年平均侵蚀总量为 320 亿 ~ 510 亿 t,全球河流入海泥沙年平均总量为 130 亿 ~ 180 亿 t。我国北方的河流含沙量较高,在全球多年平均输沙量大于 1 亿 t 的 25 条河流中,我国就有 9 条。全国平均每年进入江河的泥沙量曾高达 35 亿 t^[3],其中约 21 亿 t 输入海洋,有 12 亿 t 泥沙淤积在水库、河道、湖泊及灌区中。长期以来,河流的自然变迁,挟带泥沙塑造出了宽阔富饶的平原陆地,河流的开发利用,局限了泥沙淤积分布的范围,河道淤积引起泥沙灾害,也加剧了洪水灾害。为了解决洪水灾害,修建水库蓄水拦沙后,河流水沙条件发生显著变化,水库泥沙淤积,坝下游河道冲刷,水沙条件变化对河床演变的影响将逐步显现,这就要求河道治理及航道治理与之相适应。

以长江为例,长江的多年平均输沙量曾高达 5 亿 t,泥沙塑造了宽广肥沃的长江中下游平原,但随着长江流域的开发利用(水利工程和湖泊围垦等),泥沙淤积也造成长江中游河道和洞庭湖湖区的进一步萎缩,形成流量小、水位高、危害重、损失大的局面,一般洪水就引起荆江河段防洪紧张,并呈逐年加重的趋势^[4],直到 2003 年三峡水库投入运用后这种趋势才有所改变。随着三峡水库及其长江上游梯级水库陆续投入运用,长江泥沙分布出现了新变化,水库泥沙淤

积,坝下游河道冲刷,长江中下游的输沙量大幅度减少,如三峡水库蓄水后宜昌站 2003 ~ 2012 年平均年输沙量为 4 820 万 t,较三峡水库蓄水前平均值减少 90%,水沙条件显著变化对长江中下游河床演变、江湖关系及河口生态等的影响将逐步显现。

黄河是世界著名的多沙河流,输沙量居世界大江大河首位,多年平均输沙量曾高达 16 亿 t。在历史上,泥沙使黄河下游河道不断处于河口延伸—河床抬高—决堤—改道—再抬高—再决堤的循环中,塑造出约 20 万 km² 的华北大平原^[5],黄河决堤改道也损失了无数财产和生命。黄河下游堤防工程巩固后,河床不断淤积抬高,使得黄河下游成为世界闻名的地上悬河,特别是 20 世纪 80 年代中期,黄河下游主河槽淤积萎缩,“二级悬河”发展迅速,小水即漫滩成灾,河道功能性断流,河口三角洲退蚀,生态恶化^[6]。1999 年小浪底水库投入运用后,黄河下游的来沙量大幅减少,2000 ~ 2012 年小浪底站平均年输沙量为 0.66 亿 t,比小浪底水库运用前输沙量(1986 ~ 1999 年小浪底站平均年输沙量为 7.33 亿 t)减小了 91%,通过小浪底水库蓄水拦沙和“调水调沙”运用,黄河下游河道冲刷,下游河槽萎缩问题有所改善,但“二级悬河”严重的局面尚未根本改变,黄河入海沙量少于维持黄河口三角洲稳定的临界年沙量,河口三角洲整体处于退蚀状态,不利于河口造陆和湿地维护。水沙条件的显著变化对河床演变、河口生态等的影响也逐步显现,需要通过泥沙优化配置改善黄河泥沙的空间分布状况^[7]。

在世界各国的流域综合治理开发实践中,虽然以水资源和水能开发为中心的治河模式使江河治理开发取得了巨大成就,但对江河治理开发引起水沙条件的变异导致河流系统调整的机制认识不足,引发了许多意想不到的河流水文活力消退、生态环境失衡等不良响应。例如,欧洲莱茵河采取渠化工程,在干支流上修建的一系列堰坝截断了泥沙供应,洪水期河道冲刷造成两岸地下水位下降和航道恶化,德国工程师只好花费大量人力物力进行人工喂沙,每年喂沙 20 万 t^[1];非洲的尼罗河修建了世界著名的阿斯旺(Aswan)大坝后,虽然改善了灌溉和防洪条件,但建坝改变了下游的来水来沙条件,造成下游河床冲刷、河道蜿蜒摆动、河道断流、河口三角洲蚀退、海水入侵和海岸侵蚀等,随之带来河口湿地

退化和生态环境破坏^[8,9];美国的密西西比河修建了大量水坝及整治工程后,枯水径流的不足引起河口海岸侵蚀和湿地丧失等环境恶化问题,每年丧失土地约4 047 hm²,为了解决这些问题,密西西比河下游不得不实施调水工程,将浑水调到三角洲,以便提供泥沙和营养物质,维持河口生态^[10]。在美国,由于恢复河流自然生态环境、保障人身安全及节约资金等,截至2013年,已经拆除了1 108座闸坝,在制订拆坝决策方案时,库区泥沙处置是其中最具挑战性的关键环节^[11]。

随着社会发展对资源和环境的要求不断提高,水沙灾害和泥沙利用对社会经济发展的影响越来越突出,泥沙合理配置势在必行。水沙灾害(主要包括水土流失、水库与河道淤积、洪水泛滥、泥石流等)直接造成严重的经济损失,为了防治水沙灾害人们也付出了巨大的代价^[12]。江河洪水灾害加剧的直接原因之一是泥沙灾害,最明显的表现为河道泥沙淤积引起洪水位上涨,导致小水大灾。传统上将泥沙作为灾害来考虑,直接或间接造成数亿经济损失,在技术发达而资源紧张的现代社会,如果采取一定措施合理利用泥沙,大自然产生的巨量泥沙也可以成为大自然带给人类的巨大财富。随着人们对社会环境需求和水沙资源认识的不断提高,流域水沙优化配置与泥沙的资源优化利用逐渐被认识和接受^[13,14],泥沙在国民经济建设中已开始发挥一定的作用(如肥田改土造地、淤临淤背固堤、建筑材料等)。因此,通过深入研究泥沙均衡配置理论和模型,探讨水沙联合配置模式,使水沙灾害得到有效控制,泥沙作为资源得到充分利用,通过泥沙资源优化利用实现泥沙灾害治理,达到兴利除害和充分利用泥沙资源的目的,可以对社会经济发展产生深远的影响并带来巨大的效益。

对于水少沙多、水沙关系不协调的黄河下游而言,维护河床演变的均衡稳定和泥沙的均衡配置具有更为重要的现实意义,为了维护黄河下游河槽均衡稳定、治理“二级悬河”,迫切需要掌握水库调度运用对下游河道稳定及泥沙合理配置的影响,探讨恢复和维持下游中水河槽的措施,结合河道及滩区综合治理、标准化大堤建设和河口生态治理,研究在新条件下改善黄河下游河道输水输沙能力和维持河道稳定的泥沙配置模式。因此,在研究泥沙均衡配置理论和数学模型的基础上,进一步探讨黄河下游泥沙合理配置的模式,对黄河的综合治理和泥沙资源的综合利用是十分必要的。

总之,河槽淤积萎缩、“二级悬河”形成、水库迅速淤积、河道剧烈冲刷或淤积、河口快速淤伸或蚀退等都是河流泥沙分布不均衡的表现形式,河流输送适量泥沙对维护河道均衡稳定和生态环境健康起着重要作用,由于自然气候条件的变化和人类活动的影响,很多河流的水沙条件出现明显变化,维护河床演变均衡稳定和泥沙均衡配置问题日益突出。本书通过理论研究、资料分析和数学模型计算,开展河流泥沙均衡理论及其应用研究,研究成果对黄河下游河道治理和泥沙利用具有重要的实际意义和应用价值,也对其他河流的河道治理和生态修复具有重要的参考价值,对于推动河床演变学及泥沙运动力学研究的发展也具有重要的科学意义。

1.2 河流泥沙均衡配置研究进展

河流泥沙均衡配置是通过水沙调控和泥沙合理配置改善河流的泥沙分布。水沙调控最早是在水沙灾害严重的黄河流域上提出的,钱宁等^[15]提出通过水库调水调沙改造黄河下游河道,利用上游水库拦沙库容合理拦沙,拦粗排细,减少下游淤积,调水调沙运用人造洪峰,提高河道输沙能力,创造漫滩机会,改善泥沙淤积部位。在黄河治理开发中,始终把泥沙处理放在突出位置,经过长时期的探索,人们认识到解决泥沙问题的艰巨性、复杂性与长期性,必须采取多种措施来综合处理和利用黄河的泥沙,并逐步形成了采取“拦、排、调、放、挖”等措施综合处理和利用泥沙的方略^[16,17]，“拦”是通过中上游地区水土保持和干支流控制性骨干工程拦减泥沙；“排”是通过河道整治,规顺流路,形成窄深河槽,将拦不住的泥沙通过河道尽可能多地输送入海；“调”是利用干支流骨干工程调控水沙过程,使之适应河道的输沙特性,以减少河道淤积及节省输沙水量；“放”是利用河道滩地与两岸洼地处理和利用一部分泥沙；“挖”是在局部淤积严重的河段和河口河段挖河疏浚,结合淤背固堤和淤高低洼地面,增加可用土地,处理和利用泥沙。

20世纪80年代中期以来,进入黄河下游的水沙量大幅减少,水沙过程发生了质的变化,使得下游河槽淤积萎缩,“二级悬河”迅速发展,防洪形势日趋严

峻,泥沙处理负担沉重,已成为新形势下黄河治理的关键问题之一^[6]。为了实现黄河“堤防不决口,河道不断流,水质不超标,河床不抬高”的目标^[18],将通过多条途径(水土保持、跨流域调水、水资源统一管理、水沙调控体系建设、下游河道及河口综合治理等)解决黄河“水少沙多”和“水沙不平衡”问题,促进以黄河为中心的河流生态系统良性发展。截至目前,在黄河流域及中上游河道上修建了大量的水利工程(淤地坝、水库、引水工程等),其主要目的之一是通过水利工程的拦水拦沙和调水调沙建立全河的水沙调控体系,使得泥沙在流域、水库、河道、滩区、灌区与河口等区域内有一个合理的分配,合理利用水沙资源,有效控制和解决黄河下游河道淤积萎缩、“二级悬河”、功能性断流、河口退蚀、生态恶化等问题,特别是小浪底水库的调水调沙运用^[19,20],希望通过水库调控出库水沙过程,将进入黄河下游河道不平衡的水沙关系调节为协调的水沙关系,减轻黄河下游河道淤积,通过小浪底水库调水调沙运用,下游河槽的淤积萎缩状况有所改善。

在世界范围内,虽然有大量泥沙利用的研究成果和典型事例,如巴西的挖泥造地^[21]、美国圣地亚哥河口恢复治理^[22]、美国密西西比河的浑水灌溉^[10]以及埃及尼罗河上的引洪改沙^[8]等,又如我国黄河流域实行的淤改、泥沙造地、淤临淤背等^[23-26],但这些泥沙利用仅局限于小范围或某个行业局部利益上,其数量很有限。泥沙的资源化及其优化配置的理论研究近年来有所加强,胡春宏^[27]提出在江河治理中将泥沙作为一种资源与水资源一起优化配置和综合利用,水资源的统一调控必须与泥沙的统一调控相结合,特别是在多沙河流上更需如此;李义天等^[13]分析了河流泥沙资源化的必要性并提出了开发利用措施;廖义伟^[28]提出要对黄河进行水库群水沙资源化联合调度管理的理念和水沙一体化、“科学拦蓄、调排有序、挖放结合、分滞兼顾”的调度管理思想;胡春宏等^[29,30]从流域水沙配置的角度,提出了上游拦沙(水土保持和水库拦沙)、中游用沙(水沙综合利用和优化配置)、库区治沙(挖泥疏浚)和下游排沙用沙等内容的流域水沙综合治理措施。

通常人们比较注重洪水灾害和水资源短缺,关于水资源配置的研究成果比较多^[31,32],形成了一套相对完善的配置理论和技术^[33],水资源系统的规划和运

行问题,其最终目标都是求解模型得到一个最优或拟最优的规划方案或运行方案。通常这种模型由两部分组成:目标函数方程和约束条件方程。从最优的角度来求解这些方程组,数学上统称最优化技术或最优化方法^[34],为了对水资源系统的规划运行推导一个最优方案,通常有三条途径:①应用分析技术,以线性规划和动态规划最为常用;②应用模拟技术,通常包括模拟和最优寻查技术;③前两种方法的综合。泥沙均衡配置采用多目标规划(MOP)的理论和方法^[35],多目标规划也称多准则规划,从数学角度也可叫向量最优化(VOP),多目标规划和向量最优化方法的研究,在近二十几年来发展很快,迄今为止至少已有30种不同的方法,包括权重法、约束法和目标规划法等,其关键是非劣解集的生成、效益交换比的计算和最佳协调解的寻求。

水沙联合优化配置数学模型研究,国内外主要集中于水库水沙联合调度运用问题,张玉新、冯尚友^[36]运用多目标规划的思想方法,以计算期内发电量最大和库区泥沙淤积量最少为目标,建立了水沙联调多目标动态规划模型;杜殿勋、朱厚生^[37]以下游河道淤积量为基本目标,考虑发电、灌溉、供水和潼关高程影响,建立了水库水沙联调随机动态规划模型,研究了三门峡水库的水沙综合调节优化调度运用;刘素一^[38]针对水库汛期排沙与发电之间的矛盾,采用水库冲淤计算与水库调度交替的方法对水库排沙进行了优化计算;彭杨等^[39]以水库防洪、发电及航运调度计算为基础,采用多目标理论和方法,提出了水库水沙联合调度的多目标决策模型及其求解方法,并将该方法运用于三峡水库蓄水时机调度问题;国外也对水库水沙联合调度运用问题进行了类似的研究^[40,41]。孙昭华^[42]针对水库下游水沙调控优化河道冲淤分布的设想,提出将优化理论与水沙数学模型相结合,以水库运行、水沙运动及河床变形方程为约束条件构造非线性动态规划模型的构想,但以目前的数学和计算机水平尚难以准确求解,也难以计算流域面上的泥沙均衡配置。胡春宏、陈绪坚^[43]构建了流域水沙资源联合多目标优化配置理论框架,建立了流域水沙资源优化配置数学模型,并利用该模型计算分析了黄河下游不同水沙条件的水沙资源优化配置方案,为进一步研究流域泥沙资源优化配置及其应用奠定了理论基础。

近年来对流域泥沙配置与利用开展了进一步研究,胡春宏等^[7]采用实测资

料分析、数学模型计算和理论研究分析等多种手段,围绕黄河干流泥沙优化配置的理论、模型、潜力与能力、技术与模式、方案与评价等进行了系统的研究,构建了黄河干流泥沙优化配置的总体框架,研发了黄河干流泥沙优化配置的数学模型,分析了各种配置方式的泥沙安置潜力与配置能力,提出了黄河干流泥沙优化配置方案的综合评价方法,并推荐了不同条件下黄河干流泥沙优化配置的方案及不同时期干流各河段的沙量配置比例。今后应在流域泥沙配置与利用的原理方法、配置措施、配置模型、配置技术方面继续开展深化研究,为泥沙资源的利用和合理配置提供更好的技术支持。

1.3 河床演变均衡稳定研究进展

冲积河流河床演变均衡稳定是指输沙相对平衡、河道相对稳定。国内外对于泥沙运动与河床演变规律方面的研究成果非常丰富^[44-48],天然河流输水输沙过程通常是非平衡非饱和过程,符合冲积河流河床演变的基本原理——自动调整作用原理:针对不同的来水来沙条件和河床边界条件,河流通过不断调整河宽、水深、比降和床沙组成等物理量,力求达到输沙相对平衡。由输沙不平衡所引起的河床变形,在一定条件下朝着恢复输沙平衡、使变形停止的方向发展,但在数学上如何表达冲积河流河床演变的自动调整作用原理是河床演变研究的难题之一。河流在力求达到输沙相对平衡过程中,其物理量的调整不是随意的,而是遵循一定规律的,为了研究这一规律,前人进行了长期艰苦的研究,提出了很多理论和假说,主要包括:

(1) Leopold 等^[49]提出河流能量沿程均匀分布的最大统计熵理论:相当于流速和比降的乘积 $UJ = \text{常数}$ 。Leopold 最先提出应用熵理论来研究河床演变,由于河流沿程各河段的能量分布受地质地貌条件控制不能沿河自由调整,能量沿程分布不满足构造的统计熵的条件,因而河流能量难以达到沿程均匀分布。

(2) Langbein^[50]提出最小方差假说:随着上游来水来沙条件的变化,当地的水力因子将发生调整以趋于平衡,与这种平衡状态对应的是使各水力因子变化的方差达到最小。Langbein 提出的最小方差假说在理论上符合物理统计熵的最

概然分布定理,但选择什么变量来统计方差无法确定,各人构造的统计方差可能互不相同。

(3) 窆国仁^[51]提出最小河床活动性假说:在给定的来水来沙和河床边界条件下,不同的河床断面具有不同的稳定性或活动性,而河床在冲淤变化过程中力求建立活动性最小的断面形态。由于河床活动性指标为经验表达式,难以在理论上阐明,也缺乏实测资料进行严格的验证^[52]。

(4) 杨志达(Yang C. T.)^[53,54]提出最小单位河流功理论:对于冲积河道缓流,河道将调整流速、坡降、糙率和河床形态,使输送一定水量和沙量的单位河流功率最小,最小值大小取决于河道约束条件,表达式为: $UJ = \text{最小值}$ 。杨志达对最小能耗理论进行研究取得较大的进展,基于最小单位河流功理论,杨志达等^[55-58]对输沙率和河流动床形态等问题做了很有意义的研究工作,但河流功在物理概念上不明确,有河道给水流做功之嫌,挟沙水流只能损失自己的能量对运动中的泥沙做功,河床不能对水流做功,河床无能量传递给水流,但河道对水流的阻力分布和特性决定了水流能耗的分布和特性。

(5) 张海燕(Chang H. H.)^[59]提出河流系统的最小河流功假说:对于一定的水流流量和输沙量,当河道可能有几种稳定河床形态和坡降时,河床形态将沿河谷坡降进行调整,使河流系统的单位河长河流功最小($\gamma QJ = \text{最小值}$)。由于流量 Q 给定, $\gamma QJ = \text{最小值}$,即坡降 $J = \text{最小值}$;对于稳定的冲积河流,河流功 γQJ 与输沙率 Q_s 成正比, $\gamma QJ = \text{最小值}$,即 $Q_s = \text{最小值}$ 。张海燕利用 $J = \text{最小值}$,结合水流阻力公式和输沙率公式,建立数学模型,计算和分析平衡河流形态和河型成因^[60,61],并用来设计稳定的冲积渠道^[62]。张海燕提出的最小河流功假说认为冲积河流的调整是为了满足坡降最小是不全面的,钱宁指出河床演变不仅仅是调整比降^[63],而且张海燕提出的最小河流功假说认为冲积河流的调整是为了满足输沙率最小,这与挟沙能力理论及冲积河流自动调整作用相矛盾。

(6) 杨志达(Yang C. T.)等^[64]提出单位河段最小能耗率理论:自然河流趋向于调整在一定约束条件下可以调整的变量,达到以最小的能耗率输送水和沙的目标。对于流量一定的单位河段: $\gamma QJ = \text{最小值}$ 。对于断面一定的均匀流河段: $\gamma UJ = \text{最小值}$ 。他从不可压缩流体的雷诺紊流平均运动方程出发,对于明