

灌区泥沙问题研究的回顾与展望

张耀哲^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以流域高质量发展大背景下灌区建设发展的现实需求为出发点, 简要归纳了从取水头部到渠系末端, 渠灌区所存在的四个方面的工程泥沙问题, 在此基础上重点回顾和总结了包括渠首工程泥沙问题、干渠粗颗粒泥沙处理技术、明渠挟沙水流运动理论及灌区泥沙治理方略发展沿革、实现渠灌区浑水安全输移与水沙调控目标的相关理论与方法等几个方面的研究进展。分析探讨灌区工程泥沙问题妥善解决需进一步开展研究工作的重点与目标, 对更好解决灌区泥沙问题, 保障大型灌区输配水系统长期安全可持续运行, 具有重要意义。

关键词: 灌区; 泥沙; 水沙调控

中图分类号: TV14

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)06—0010—08

Retrospect and Prospect of Research on Sediment Issues in Irrigation District

ZHANG Yaozhe^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To satisfy the actual needs of the construction and development of irrigation districts under the background of high-quality development of the river basin, this work briefly summarised four aspects of engineering sediment problems existing in the canal irrigation district, from the head of the water intake to the end of the canal system. More specifically, the research progress of these problems, including the sediment problem in the canal head engineering, the treatment of coarse-grained sediment in the main canal, the theory of sediment-laden flow in the open channel and the development of sediment control strategy in the irrigation area, and the related theories and approaches in achieving the safe transportation of muddy water and regulation of water-sediment in the canal irrigation area, are reviewed and summarised. Ultimately, this work analysed and discussed the key points and goals of future work in properly solving the sediment problem in irrigation area, which is of great significance to deal with the sediment problem and ensure the long-term safe and sustainable operation of the water delivery and distribution system in large irrigation areas.

Keywords: irrigation district; sediment; water and sediment regulation

工程泥沙学运用泥沙运动力学和河床演变学的理论解决各类生产实践中所遇到的泥沙问题, 这三者与泥沙来源及其基本性质研究共同构成了泥沙学科的四大核心研究内容^[1-2]。灌区泥沙问题是一个经典的工程泥沙学问题。我国现代泥沙运动学理论研究的奠基人之一沙玉清先生, 在上世纪三十年代

初就着眼于防洪与灌溉两大战略性的水利任务, 毕生聚焦于灌溉工程生产实际中的技术问题和与之相关的科学问题, 构建的农田水利学、灌溉工学、泥沙运动学理论研究体系, 为我国现代水利事业的发展, 做出了开拓性的贡献。新中国成立后, 老一辈水利科技工作者对泥沙运动理论的创新和发展, 为

不同时期灌区泥沙问题的合理有效解决提供了坚实可靠的理论基础^[3-9]。进入21世纪后,在流域综合治理的大背景下,作为流域水沙治理的重要组成部分,灌区泥沙问题受到进一步重视,并取得多项重要成果^[10-12]。当前,水资源短缺问题日趋严重,灌溉农业由粗放型向精准化方向转换,节水灌溉与水资源高效利用以及智慧水利建设等多重约束下,以河道为水源的渠灌区泥沙问题妥善解决面临诸多新挑战,黄河流域高质量发展目标也对引黄灌区引水用水提出了新要求^[13-18]。分析探讨渠灌区工程泥沙问题的现状,回顾和总结相关方向的研究进展,明确进一步开展研究工作的重点与目标,对更好解决灌区泥沙问题,保障大型灌区输配水系统长期安全可持续运行,具有重要意义。

1 渠灌区主要工程泥沙问题

渠灌区主要工程设施由灌溉水源工程、干支斗农渠及管网输水排水工程、各类闸阀与量水设施、末端灌水器具以及与智慧水利相关的监测控制系统等部分组成。以天然河道为水源的灌溉渠系,根据取水头部与河道的相互关系,分为无坝取水和闸坝枢纽取水,取水方式又分为泵站抽提和自流取引水。取水头部防沙措施是否妥当,是渠系浑水能否被安全输移配送的关键影响因素,进入灌溉渠系的浑水,以不冲不淤的平衡态安全输移到农田末端,是浑水渠灌区输配水系统水沙调节的最高目标。由于灌溉渠系水力几何条件沿程变化,各类输配水节制措施和末端灌水器具的节点效应,以及来自河流浑水体中泥沙颗粒级配的非均匀特性,导致灌溉渠系中运行的挟沙水流呈现非平衡态运动特征,挟沙力与含沙量的不平衡所引起的泥沙冲淤,构成了灌区主要的工程泥沙问题。无坝自流取水形式对天然河道的河势条件要求苛刻,基于弯道水流水沙分流原理的取水头部防沙措施相对比较成功。目前灌溉渠系泥沙问题最为严重的,是以多沙河流无坝抽提取水为水源工程的渠灌区。

以多沙河流岸边式泵站为水源工程的渠灌区,其灌区泥沙问题主要包括以下几个方面。首先,泵站取水头部防沙技术措施与大型灌区取引水量不相适应,导致大多数抽提灌溉工程的渠首防沙设施难以发挥作用,悬移质中的床沙质和河床表层的沙质推移质通过泵站进入渠系,成为灌溉渠系粗颗粒泥沙致灾的主要根源。其次,渠首防沙屏障失守后,进入灌溉渠系的有害粗颗粒泥沙沉排处理不及时,粗

颗粒泥沙经由各级泵站抽提输运至灌溉渠系的各个节点,构成渠系各类输配水设施长期安全可持续运行的直接隐患。第三,在水资源短缺和浑水资源高效利用的需求推动下,悬移质含沙量较高的浑水也被主动引入灌溉渠系,使得粒径较细的悬移质泥沙也引发了局部淤积问题。第四,渠系输配水节点处的各类闸门和量水配水设施,以及渠系末端的灌水器具等设施,大多数都只考虑了清水运行工况,浑水工况运行时泥沙淤堵等传统问题一直未得到很好解决,新形势下基于灌区水沙输移与调控的理论与方法亟待创新和发展。

2 灌区泥沙问题研究的主要进展

2.1 渠首工程泥沙问题及其研究进展

闸坝枢纽形式的渠首引水防沙问题已经有相对成熟稳妥的解决方案^[1-2,19]。基于弯道水流水沙分流原理的取水防沙理念,构成了各类无坝自流引水渠首工程的核心技术^[20-22],无坝自流引水渠首工程,其严格苛刻的技术条件满足了防沙目标,但引水流量及供水保证率受到很大程度的限制。近几十年以来,岸边泵站取水工程被大规模采用,岸边泵站式渠首工程在选址上基于河床演变学的相关理论,尽可能利用天然河流的河势特征,仍然以弯道水流水沙分流原理作为第一道防沙屏障,防止推移质泥沙或悬移质泥沙中的床沙质进入泵站,再以分层取水原理在进水流道前端设置叠梁闸,防止悬沙中的床沙质及高浓度浑水进入泵站^[1-2]。多年的工程应用实践表明,对于取水流量相对较小,供水保证率要求较高的工业用水水源,岸边泵站式渠首工程取水和防沙的目标通过相应的辅助工程措施基本上都能得到满足^[23-24]。但对于取水量较大的灌区渠首工程,尤其是以多沙河流为水源的岸边泵站式渠首,取水量得到保证的同时,防沙入渠的目标却很难得到实现。其主要原因在于,天然河流来水来沙条件的时空变化和上下游河道整治工程所引起的河床边界条件改变,以及干流河道拦河建筑物对河流侵蚀基准的影响,促使干流河道河势变迁,导致泵站脱流现象非常普遍,岸边式泵站依靠天然河流的河势条件防粗沙的目标不但难以实现,为了能够在不利的干流河道水动力条件下,以有限宽度的取水头部引取足够的流量,只有降低甚至取消叠梁的运行,使得分层取水防悬沙的目标也难以实现,进水流道前一定区域复杂特殊的水流流场,还将大量床面泥沙扬动后输运进灌溉渠系。针对大型灌区无坝岸边式取水

站床面泥沙及悬移质中的床沙质持续进入取水头部这一问题,受制于叠梁运行高度的限制,现有技术难以从根本上解决。现有的泥沙运动理论体系,常规水动力条件下床面附近泥沙运动规律研究比较成熟^[5,25]。泵站进水流道流场特性对泥沙运动的影响是一个非常复杂的问题,现有探索性研究成果^[26]尚难以反映大型抽水泵站粗沙入渠的本质。如何防止床面泥沙在泵站进水流道特殊流场作用下扬动并进入取水头部,是抽水泵站普遍需要解决的技术难题。基于天然河流悬移质含沙量及泥沙粒径沿垂线分布规律,通过分层取水防止河流水体中的有害悬沙,是一项非常传统的技术^[1-2],相关基础性研究也在持续不断完善和发展中^[27-29],这些成果在叠梁闸分层取水的运行管理中一直发挥着基础指导作用。

2.2 干渠粗颗粒泥沙处理技术研究进展

多个大型抽黄灌区的实测资料表明,造成干渠大量淤积的有害泥沙,其粒径级配,与渠首站所在河流相应水文观测断面多年平均悬移质泥沙粒径有非常大的差别,如黄河龙门站多年平均悬移质泥沙 D_{50} 粒径为 0.029 mm,而山西尊村灌区一级站干渠沉沙池淤积泥沙的多年平均 D_{50} 粒径则为 0.075 mm,同样的问题也存在于在一河之隔的陕西东雷抽黄灌区。中国水科院对实测资料分析后认为,引黄灌区干渠沉沙池淤积的泥沙中,粒径大于 0.05 mm 的粗沙占全部淤积泥沙的 85%~90% 以上。对于渠灌区,一般都大于 0.05 mm 的泥沙称之为有害的粗颗粒泥沙。粗颗粒泥沙由于其非黏性特点,与之相关的沉沙池设计理论都比较成熟^[2],沙玉清先生在我国最早开始灌区沉沙池理论的研究^[30],近多年来,山西省水利水电设计研究院等单位,基于非平衡输沙理论,对抽黄灌区干渠沉沙池的设计理论和计算方法进行过比较全面的分析,在运行管理方面也积累有丰富经验^[31]。目前,大型灌区干渠粗颗粒泥沙处理的最大难度,不是沉沙池沉积效率的问题,而是来沙量与沉沙池容积之间的矛盾。为解决沉沙池长期可持续运行问题,基于自排沙构想的相关理论与技术研究取得了一些进展^[32-35],但是由于这类技术其自排的动力,根本上还是泵站扬起的水头或天然地形条件所提供的足够大的高程落差,因此在实际推广应用中有很大的局限性。华北水利水电大学^[36]和塔里木大学^[37]基于新的设计理念开展了一些探索性的自排沙试验研究工作。尊村抽黄灌区目前正在探索利用传统的疏浚与吹填技术解决沉沙池淤满报废问题,中国水科院开展了移动式水力清淤

装置试验研究^[38]。

2.3 明渠挟沙水流运动理论及灌区泥沙治理方略的研究发展

自 20 世纪 30 年代中期沙玉清先生在国内率先开展渠道中泥沙运动规律的研究,并提出“黄土渠安定渠槽之设计法”^[39]以来,发端于灌溉渠系泥沙问题的明渠水沙运动基本规律,成为泥沙运动力学最基础的研究内容。钱宁等系统地研究了明渠水流中的各粒径级泥沙的运动状态,建立了有关泥沙运动的一些基本概念,提出了悬移质中床沙质与冲泄质的划分标准,完善和发展了泥沙运动力学的相关理论体系;窦国仁等对水流结构、泥沙运动、推移质和悬移质输沙等进行了系统研究,提出了紊流随机理论、粘性细颗粒泥沙起动流速公式、非恒定流不平衡输沙方程式等;张瑞瑾和谢鉴衡等推导得到了著名的明渠挟沙力公式,总结泥沙学科的理论与实践,形成了系统的能直接指导工程实践的泥沙学科教科书;韩其为等建立了泥沙统计理论、非均匀不平衡输沙理论,得到了非均匀不平衡输沙的含沙量、悬沙级配、床沙级配以及恢复饱和系数等理论表达式;倪晋仁等从理论上揭示了无论采用何种理论,如扩散理论、能量理论、混合理论、相似理论、两相流理论、随机理论,在描述泥沙悬浮时都能归结为相似的数学方程形式,求解获得了悬移质泥沙浓度分布的统一公式;王光谦等提出了固液两相流的动理学理论,对流体相采用宏观连续介质模型描述,对离散颗粒相采用微观动理学模型描述,应用该理论得到了颗粒速度的概率密度分布函数、颗粒垂线浓度分布和平均速度分布,揭示了泥沙颗粒运动与清水湍流的不同特性,并证实经典的泥沙紊动扩散理论是动理学理论的特例^[40-44]。胡春红等^[45]基于实验流体力学的理论和方法对明渠挟沙水流运动的力学和统计规律进行了系统完整的研究和论述。方红卫等^[46]以流域泥沙颗粒物理输移过程为主要研究对象,从微观角度出发,揭示了泥沙颗粒在流域营养物质输移,化学物质输移和生物输移中的重要角色,用数学方法描述了泥沙颗粒的形状和表面结构,用概率统计的方法构建了数学泥沙的研究平台,并据此结合吸附动力学方程,开发完善了水质水沙数学模型。在上述基础理论研究深入开展的同时,近几十年来,以高含沙引水及淤灌技术为代表的渠系泥沙应用研究也取得了显著进展^[47],基层管理部门抽黄灌区几十年工程应用实践,也为灌溉渠系水沙安全输移提供了宝贵的经验^[48]。

鉴于渠首防沙和干渠前端集中处理泥沙存在诸多局限和不足,已有的渠灌区泥沙处理技术与措施难以满足社会经济不断发展的需要,中国水科院、清华大学等单位提出了灌区泥沙远距离分散配置模式,寄希望通过远距离输沙、多级分散沉沙等方式处理进入灌溉渠道的泥沙^[49-51];基于灌区泥沙问题的分析,指出了灌区发展及泥沙治理的4个历程分别为,灌区建设与泥沙处理阶段、灌区发展与泥沙治理利用阶段、灌区节水与泥沙远距离输送阶段和灌区泥沙资源化与水沙配置阶段,指出灌区水沙资源优化配置是解决问题的主要途径,配置目标是协调配置灌区的水资源与泥沙资源,配置方法是多目标规划方法,并根据引黄灌区所处河道位置和地域条件,结合灌区灌溉类型和泥沙处理方式,提出了沉沙输水模式、输水沉沙模式、分水滞沙模式和输水输沙模式等引黄灌区的水沙调控模式,根据不同水沙调控模式的形成条件、调控效果和存在的水沙问题,指出不同水沙调控模式的输水输沙关键技术和重点调控目标,分别为沉粗排细调控、远距离输沙调控、分沙入支渠调控和泥沙入田调控,强调泥沙远距离分散输送技术是实现灌区水沙资源优化配置的重点^[52-53];根据灌区对入渠水沙资源的分配目标,提出了配置能力指标的表达式,并利用灌区水沙资源分布的规律性,对表达式的指标值进行了量化,根据灌区水沙资源的配置需求将配置能力指标划分不同等级,为灌区水沙资源优化配置的评价提供判定标准^[54]。

2.4 实现灌区浑水安全输移及水沙调控目标的相关理论与方法研究进展

为实现上述灌区泥沙治理的战略目标,已取得的相关研究进展可归纳为以下几个方面。

(1) 基于野外原型观测的试验研究。中国水科院采用山东簸箕李灌区近20 a来的泥沙观测资料,分析了非均匀沙在渠道中的运动和冲淤规律;通过分析黄河下游引黄灌区实测资料,初步确定粒径大于0.05 mm的泥沙为有害泥沙,需要沉沙池拦截处理,根据黄河下游来沙平均情况,大于0.05 mm的粗颗粒泥沙约占22%,需要沉沙池处理^[55-56]。西北农林科技大学通过对泾惠渠灌区年度灌水周期内干支斗农渠浑水资料的沿程实时取样分析,得到了该灌区含沙量及泥沙级配的时空变化规律,通过对渠系典型输水线路不同粒径悬移质泥沙沿程调整情况的分析,显示不同粒径泥沙沿程输移的特征不同,各分组泥沙的冲淤特征并不都和全沙平均计算结果

一致^[57-58]。中国农科院灌溉所分析了山西柳林灌区引黄水的泥沙特性,并开展了引黄畦灌田间水沙分布规律的研究^[59-60]。石河子大学等单位在尊村灌区^[61],内蒙古农业大学在蹬口扬水灌区^[62]等,先后进行了渠系泥沙输移特性的原型观测工作,掌握了不同区域灌区泥沙输移特性的第一手资料。西安理工大学以东雷抽黄灌区总干渠的泥沙淤积实测资料为依据,构建水沙数学模型,探讨通过加大干渠输水流量以减少渠道淤积的可行性^[63]。

(2) 与灌区泥沙长距离安全输移相关的基础理论研究。中国水科院针对引黄灌区构建了最早的灌区渠网泥沙数学模型^[64],提出了非饱和泥沙通量的概念及其表达式,推导了不平衡输沙含沙量垂线分布的理论解^[65],开展了非均匀沙运动特性的试验研究^[66],在分析总结以力学和概率论相结合研究泥沙运动统计理论已有成果的基础上,提出了开展非均匀沙挟沙水流研究的新思想和新方法^[67]。清华大学以絮凝动力学方程为基础,建立了黏性泥沙絮凝-沉降-再悬浮动态过程数学模型;通过三维大涡模拟研究探讨了泥沙浓度、湍动强度和湍动通量等分布特征;构建了考虑不同粒径颗粒相互作用的非均匀悬移质泥沙弥散速度本构方程,揭示了非均匀沙悬浮,本质上是浑水紊动、颗粒自身作用、其他粒径颗粒作用三种作用共同影响的结果;基于双流体紊流模型推导分析,完成对固液两相浑水模型的紊流封闭,利用实验资料对两相浑水紊流模型进行验证,解释了随着泥沙浓度增加,挟沙水流紊动抑制加剧的现象;针对传统水槽实验在非均匀沙挟沙水流研究中所存在的诸多问题,在试验方法上进行了创新^[68-73]。武汉大学通过水槽试验,研究了在流量、含沙量及水质影响下,分层运动中流速沿垂线的总体分布形态、分布规律、峰值及位置,以及清浑水界面位置等特征^[74],通过试验研究,分析了不同固结状态对黏性泥沙临界起动切应力的影响^[75];从立面二维悬移质连续性方程出发,推导了一维方程,提出了一种对流项和纵向离散项的分解方法;指出悬移质泥沙的对流速度滞后于水流的垂线平均流速,纵向离散效应不能用与紊动扩散相似的数学表达式描述^[76]。中科院力学所考虑泥沙颗粒在水中的多体相互作用,研究了黏性泥沙的絮凝沉降问题^[77],采用雷诺时均Navier-Stokes方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型建立波浪水槽,并耦合泥沙输运模型构建波致悬沙输运模型,研究非线性波输沙过程与挟沙能力^[78]。华东师范大学通过试验研究了紊动对黏性

细颗粒泥沙絮凝沉降的影响,开展了黏性泥沙的物理特性与起动应力的流变学分析^[79]。西北农林科技大学开展了高浓度含沙量对 U 型渠道水流流速横向分量和垂向分布规律影响的试验研究^[80-81],分析研究了灌溉渠道中水流挟沙力的双值关系问题^[82],以及泥沙起动标准和起动参数的关系和黏性泥沙的絮团形态等问题^[83-84]。

(3) 与渠系节点分水分沙问题相关的应用基础研究。渠系节点水沙一体化调控是实现灌区水沙调控的关键所在。早在 1920 年左右,德国学者就开始对不同分水角度与底沙分配的关系进行了研究^[85]。20 世纪针对长江航道整治问题,武汉大学对河流中汉道的分水分沙有过系统的研究^[86]。对于灌溉渠系节点的分水分沙问题,中国水科院通过室内实验资料的分析,提出了引水宽度的水深分布公式,讨论了各种影响因素对引水宽度的影响,根据引沙比与引水宽度的关系,初步探讨了灌渠推移质和悬移质泥沙引沙比与引水比的关系^[87];对明渠岸边不同角度取水口的水力特性进行了系统的试验研究^[88]。利用含沙量垂线分布理论公式,推导得到渠道自分流时分沙比与分流比呈 0.9 次幂关系式,并利用灌区引水含沙量与大河含沙量的统计数据进行了初步验证^[89-90]。西北农林科技大学结合实际渠道工程,对梯形渠道渠系节点三维流场的流场特征及分水分沙规律进行了试验研究^[91],量化描述了渠系节点悬移质泥沙淤积的分布特征^[92]。

(4) 与渠系水沙调控相关的特殊工况泥沙问题研究。天津大学基于理论分析和实际工程资料为依据,将闸门前淤泥考虑为由泥沙组成的宾汉体泥浆,并将淤泥对闸门的附着力分解为泥沙与门体之间的摩擦力浆体提供的宾汉极限剪切力,提出了泥沙淤积对闸门启门力影响的计算公式^[93]。西北农林科技大学结合实际工程问题,研究了支渠闭闸期间前段泥沙淤积问题,指出闭闸期间前段出现围绕竖轴呈现近似椭圆型的回流现象,平面流速呈交替增减、水位呈中心低周界高的水力特征;泥沙淤积呈现累积性淤积特征,提出了闭闸期间前段泥沙淤积速率的估算方法^[94],研究了浑限状态淤积泥沙的微观结构^[95]以及泥沙粒径对大流道迷宫灌水器堵塞的影响等问题^[96]。中国农业大学对滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系开展了研究^[97];采用双流体模型对尊村二级泵站的双吸离心泵内水沙两相流进行数值模拟,分析研究了 16 种典型工况下,入口泥沙体积分数和泥沙粒径对泵内磨

损的影响规律^[98];建立了流体湍流强度变化率与颗粒动态尺度、固相体积浓度的关系式,得到了新的泥沙扩散系数的计算模型,使得圆管中不同含沙工况下的固相体积浓度分布计算值与试验值的最大相对误差小于 10%,计算精度比现有泥沙扩散系数计算模型显著提高^[99]。

3 对灌区泥沙问题研究的几点思考

(1) 以低水头枢纽和各类拦河建筑物在内的有坝取水水源工程,无论是自流引水还是泵站抽提取水,取水头部引水防沙措施在我国已经有非常成熟的经验积累,这类取水头部的灌区,如果粗颗粒泥沙灾害依然严重,则需要从取水头部设计的技术层面寻找原因。目前灌区泥沙灾害问题最为迫切和严峻的,是无坝岸边泵站抽提取水为水源工程的渠灌区,其首要特征,是泵站建成运行多年以后,干流河势改变,主流不靠泵站所在的岸边所诱发的一系列引水防沙问题。解决泵站脱溜,同时满足引水与防粗沙的目标,有两种可能途径,一个是对干流河道实施整治工程,控导河势营造岸边泵站取水防沙的最佳水流条件,现实中问题的主要症结在于各个水管理部门间的协调。另一个途径是借助工业水源工程建设的经验,修建能满足灌区用水量的大型河心式泵站,这方面尚存在需要解决的技术问题。

(2) 对于干流河道主流不靠岸等劣势水流条件下,已经建成的无坝岸边泵站水源工程,通过取水头部防沙设计的优化和创新,从源头上防止 0.05 mm 以上有害粗颗粒泥沙进入泵站机组,虽然有诸多需要进一步研究的科学技术问题,但却是解决灌区粗沙危害的根本,通过干渠沉沙池处理粗颗粒泥沙,只能作为取水头部防粗沙的辅助补充措施。

(3) 从流域尺度看,实现泥沙资源综合利用,理想状态下灌区引浑用沙的任务,将主要集中在细颗粒泥沙的输移和调配方面。黏性非均匀沙所涉及到的泥沙运动规律等问题,一直是泥沙运动力学研究的经典难题,有很多需要解决的科学问题,在紊流这一经典力学的相关机理尚未彻底弄清楚之前,明渠水流中黏性非均匀沙运动规律的研究还需要以大量试验研究为基础。智慧灌区建设的迫切需求,对一些特定工况下,黏性非均匀沙的悬浮沉降淤积和起动等一些基本性质的再认识和深入研究,也都需要基本的试验研究为手段,因此,必须高度重视黏性非均匀沙基本性质的试验研究工作。

参考文献:

- [1] 武汉水利电力学院河流工程学教研室. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利出版社,1981.
- [2] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1988.
- [3] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- [4] 张瑞瑾. 张瑞瑾论文集[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [5] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [6] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京:中国水利水电出版社,1994.
- [7] 窦国仁. 明渠和管道中层流和紊流的总规律[J]. 中国科学(A辑),1982(5):472-480.
- [8] 张浩,任增海. 明渠高含沙水流阻力规律探讨[J]. 中国科学(A辑),1982(6):571-577.
- [9] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报,1979(17):804-808.
- [10] 洪尚池,张永昌,温善章,等. 结合引黄供水沉沙淤筑相对地下河的研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.
- [11] 李义天,邓金运,孙韶华,等. 河流水沙灾害及其防治[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.
- [12] 姚文艺,李勇,张原锋,等. 维持黄河下游排洪输沙基本功能的关键技术研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [13] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. 水利学报,2019,50(1):88-96.
- [14] 史良胜,查元源,胡小龙,等. 智慧灌区的架构、理论和方法之初探[J]. 水利学报,2020,51(10):1212-1222.
- [15] 陈绪坚,胡春宏,安毓琪,等. 黄河泥沙合理配置方案研究[J]. 泥沙研究,2021,46(3):1-9.
- [16] 张楚汉,王光谦. 我国水安全和水利科技热点与前沿[J]. 中国科学(技术科学),2015,45(10):1007-1012.
- [17] 康绍忠. 加快推进灌区现代化改造补齐国家粮食安全短板[J]. 中国水利,2020(9):1-5.
- [18] 江恩慧. 黄河泥沙研究重大科技进展及趋势[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):1-9.
- [19] 刘旭东,李贵启. 我国低水头引水枢纽引水防沙问题的实践及其试验研究[J]. 泥沙研究,1983(2):10-18.
- [20] 徐国宾. 弯道式引水枢纽中弯道的优化设计[J]. 泥沙研究,1992(3):65-69.
- [21] 罗索福斯基,尹学良. 弯道水流的研究[J]. 泥沙研究,1958(1):83-95.
- [22] 孙东坡,朱岐武,张耀先,等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展,2006(1):61-66.
- [23] 张耀哲,王敬昌,梁宗祥,等. 多沙河流岸边式泵站优化布置方案试验研究[J]. 水利水电科技进展,2006(2):10-12.
- [24] 李敏,张耀哲,赵嘉恒. 曲线型束水分沙导流墙在无坝引水工程中的应用[J]. 水电能源科学,2012,30(11):95-97,214.
- [25] 刘青泉,周济福,舒安平. 床面附近泥沙运动的分析[J]. 水科学进展,2003(5):569-575.
- [26] 陈佳代,余新建,顾玥琦,等. 抽吸式取水口流场特性及其对泥沙运动的影响研究[J]. 科技通报,2021,37(8):100-107.
- [27] Sun Z, Zheng H, Xu D, et al. Vertical concentration profile of nonuniform sediment[J]. 国际泥沙研究(英文版),2021,36(1):7.
- [28] 王延召,张耀哲. 有关悬移质级配垂向分布计算方法的改进[J]. 中国农村水利水电,2018(3):186-189,195.
- [29] 贺莉,陈东,段光磊,等. 基于分数阶对流扩散方程的悬沙垂向分布[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):418-424.
- [30] 沙玉清. 沉沙池形式之研究[J]. 清华大学土木工程学会会刊第3期,1934.
- [31] 杨晋营. 水利水电工程沉沙池的运行设计和原型观测[J]. 水利与建筑工程学报,2004,2(3):35-38.
- [32] 周著,邱秀云,侯杰,等. 漏斗式全沙排沙技术及其应用[J]. 水科学进展,2001(1):95-98.
- [33] 谭培根. “自排沙廊道”专利技术在东雷抽黄灌区的应用[J]. 中国水利,2006(18):39-40.
- [34] 张毅,刘金,张耀哲. 渠底螺旋流形成及其流速结构的分析研究[J]. 中国农村水利水电,2009(11):53-55,57.
- [35] 张毅,张耀哲,裴志超. 小型自排沉沙池沉沙工况的水力学特性试验研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(4):78-82.
- [36] 刘欣,潘云文. 新型无坝取水系统设计[J]. 中国农村水利水电,2021(6):143-147.
- [37] 李林,张斌. 干旱区多沙河流引水续灌沉沙排沙池一体化设计试验研究[J]. 中国农村水利水电,2021(9):106-111.
- [38] 刘春晶,赵凡萱,段炎冲,等. 移动式水力清淤装置试验研究[J]. 泥沙研究,2020,45(6):1-7.
- [39] 沙玉清. 黄土渠安定渠槽之设计法[J]. 水利月刊,1934,9(2).
- [40] 胡春宏. 我国泥沙研究进展与发展趋向[J]. 泥沙研究,2014,39(6):1-5.

- [41] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999, 24(6): 1-9.
- [42] 韩其为, 陈绪坚. 恢复饱和系数的理论计算方法[J]. 泥沙研究, 2008, 33(6): 8-16.
- [43] 倪晋仁. 风沙两相流理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [44] 钟德钰. 泥沙运动的动理学理论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [45] 胡春宏, 惠遇甲. 明渠挟沙水流运动的力学和统计规律[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [46] 方红卫, 陈明洪, 陈志和. 环境泥沙的表面特性与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [47] 迟耀瑜, 杨廷瑞. 高含沙引水及淤灌技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [48] 相保成. 尊村灌区节水改造工程效益及问题分析[J]. 中国水利, 2007(17): 28-29, 41.
- [49] 王延贵, 胡春宏. 流域泥沙的资源化及其实现途径[J]. 水利学报, 2006(1): 21-27.
- [50] 曹文洪, 方春明, 戴清. 引黄灌区水沙配置理论与关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [51] 周宗军, 王延贵. 引黄灌区泥沙分布评价[J]. 泥沙研究, 2009, 34(1): 68-73.
- [52] 田庆奇, 苏佳林, 史红玲. 黄河下游引黄灌区水沙调控模式及其特点分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(4): 267-273.
- [53] 田庆奇, 卢健, 史红玲. 黄河下游引黄灌区发展及泥沙治理历程探讨[J]. 中国水利, 2016(1): 36-38.
- [54] 史红玲, 胡春宏, 王延贵. 黄河下游引黄灌区水沙配置能力指标研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(1): 1-7.
- [55] 胡健, 戴清, 张志昊, 等. 引黄灌区非均匀沙的输送机理研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 18-22.
- [56] 王延贵, 胡春宏, 周宗军. 引黄灌区泥沙远距离分散配置模式及其评价指标[J]. 水利学报, 2010(7): 764-770.
- [57] 张小帅, 张耀哲, 党永仁, 等. 泾惠渠灌区浑水泥沙输移特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 180-187.
- [58] 张小帅, 张耀哲, 田智, 等. 泾惠渠灌区泥沙淤积成因与减淤对策[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S1): 152-157.
- [59] 王婧, 韩启彪, 那巍. 山西柳林灌区引黄水的水泥沙特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 140-143.
- [60] 姚欣, 李金山, 黄修桥, 等. 引黄畦灌田间水沙分布规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 147-152.
- [61] 赵志华, 吴文勇, 王佳盛, 等. 引黄灌渠泥沙迁移特性与渠道挟沙力模型试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 63-71.
- [62] 高红艳, 魏占民. 铎口扬水灌区输水干渠来沙特性解析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 99-105.
- [63] 王新宏, 吴巍, 雷赐涛, 等. 东雷抽黄引水灌区退水对干渠减淤的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 131-138.
- [64] 方春明, 曹文洪. 引黄灌区渠网泥沙数学模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008(2): 81-85.
- [65] 韩其为, 陈绪坚, 薛晓春. 不平衡输沙含沙量垂线分布研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 512-523.
- [66] 许琳娟, 曹文洪, 刘春晶. 非均匀沙运动特性试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 841-848.
- [67] 韩其为. 泥沙运动统计理论前沿研究成果[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1040-1054.
- [68] 柴朝晖, 方红卫, 姚仕明, 等. 黏性泥沙絮凝-沉降-再悬浮运动过程数学模型研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1540-1547.
- [69] 白静, 方红卫, 何国建, 等. 细颗粒泥沙净冲刷和输移的大涡模拟研究[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 65-74.
- [70] 张磊, 钟德钰, 吴保生, 等. 明渠中悬移质的弥散-对流方程及悬浮机理[J]. 力学学报, 2013(1): 83-93.
- [71] 贾宝真, 钟德钰. 非均匀悬移质泥沙弥散速度本构方程[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 1-11.
- [72] 黄海, 张红武, 张磊, 等. 水沙两相浑水模型的紊流封闭及初步验证[J]. 水利学报, 2020, 51(1): 69-80.
- [73] 袁强, 张曼, 周建军. 悬移质挟沙能力水槽实验方法探讨[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 20-30.
- [74] 许文盛, 陈立, 刘林, 等. 粘性泥沙分层运动中流速垂线分布特征试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3): 315-319.
- [75] 王军, 谈广鸣, 舒彩文. 固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究[J]. 泥沙研究, 2014, 39(6): 25-29.
- [76] 张小峰, 徐顺, 卢新华, 等. 一维悬移质泥沙输移方程及其滞后和离散效应[J]. 泥沙研究, 2018, 43(4): 8-15.
- [77] 王龙, 李家春, 周济福. 黏性泥沙絮凝沉降的数值研究[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3315-3323.
- [78] 谢益芹, 周济福, 王旭. 非线性波输沙过程与挟沙能力研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 20-27.
- [79] 郭超, 何青, 郭磊城, 等. 紊动对黏性细颗粒泥沙絮凝沉降影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 18-25.
- [80] 张耀哲, 王亚林, 王文娥. 含沙量对 U 型渠道水流流速横向分布律的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 134-139.
- [81] 王亚林, 张耀哲. 含沙量变化对 U 型渠道垂线流速分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学

- 版),2011,39(9):230-234.
- [82] 王延召,张耀哲,叶瑞禄.水流挟沙能力及其双值关系分析[J].泥沙研究,2018,43(5):7-12.
- [83] 周双,张根广,王愉乐.泥沙起动标准和起动参数的关系研究[J].泥沙研究,2020,45(5):7-12.
- [84] 张宇卓,张根广.黏性泥沙絮团形态的模拟研究[J].泥沙研究,2021,46(3):16-19,42.
- [85] 佟二勋.关于目前分流分沙的研究成果综述[J].水利水电技术,1962(9):39-48.
- [86] 丁君松,丘风莲.汉道分流分沙计算[J].泥沙研究,1981(1):58-64,57.
- [87] 梁志勇,徐永年.灌区引水口水沙运动与引沙比探讨[J].灌溉排水,2000(1):50-55.
- [88] 曹继文,陈惠泉,贺益英.明渠岸边横向取水口水力特性的试验研究[J].水利学报,2003(10):32-37.
- [89] 王延贵,史红玲.引黄灌区不同灌溉方式的引水分沙特性及对渠道冲淤的影响[J].泥沙研究,2011,36(3):37-43.
- [90] 史红玲,胡春宏.分流对引黄灌区渠道淤积的影响研究[J].人民黄河,2017,39(1):1-5,20.
- [91] 叶瑞禄,张耀哲.渠系节点三维流场的试验研究[J].中国农村水利水电,2018(1):145-149,153.
- [92] 王延召,张耀哲.渠系节点悬移质淤积分布数值模拟[J].灌溉排水学报,2018,37(5):81-85.
- [93] 徐国宾,高仕,赵誉娟.淤泥对平面钢闸门启门力影响的计算方法[J].水利学报,2012,43(9):1092-1096.
- [94] 张芳芳,张耀哲,粟晓玲.灌渠闭闸期间前段流场特征及泥沙淤积速率分析[J].农业工程学报,2016,32(2):111-118.
- [95] 王澍.淤积泥沙浑限状态微观结构的分析研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [96] 任改萍,吴普特,朱德兰,等.泥沙粒径对大流道迷宫灌水器堵塞影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(3):1-6.
- [97] 张自超,陈鑫,王福军,等.考虑颗粒动态尺度影响的泥沙扩散系数模型建立及应用[J].农业工程学报,2016,32(22):129-137.
- [98] 侯鹏吗,肖洋,吴乃阳,等.黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J].水利学报,2020,51(11):1372-1382.
- [99] 李嘉兴,王福军,陈鑫.基于双流体模型的尊村泵站双吸离心泵泥沙磨损[J].科学通报 2019,64(36):3856-3866.

特邀作者简介

张耀哲,男,1963年出生,西北农林科技大学水利与建筑工程学院研究员,硕士生导师,中国水利学会泥沙专业委员会委员、水力学专业委员会委员。1985年毕业于武汉水利电力学院治河系治河工程专业,一直从事水力学及河流动力学方面的研究,专注于工程泥沙问题。主持完成与本学科相关的国内外建设项目工程泥沙问题专项研究工作三十余项,涉及河道演变与防洪治理工程问题、水利水电枢纽库区泥沙和坝区泥沙工程问题、工业取水及引水防沙工程问题,以及渠系泥沙工程问题等多个方面,发表论文四十余篇,为研究生主讲《紊流力学》、《工程泥沙概论》等课程。主持完成的水利部科研专项“多沙游荡型河流河道整治工程技术措施研究”之核心成果“四面六边透水框架群治河护岸防冲技术”,已在全国二十多个省区得到推广应用。