

湍流基础研究进展及其对应用研究的推动

张红武, 杨润祎, 余午阳, 介永胜, 王彦博

(清华大学 黄河研究中心, 100084, 北京)

摘要:在全球气候变化和极端水文事件日益频发的背景下, 能源转型与生态治理对降低能耗、提升系统效率和发展新质生产力提出了更高要求。本文围绕“科学创新”与“降低能耗”这一核心目标, 从湍流基础理论研究出发, 系统阐述了基础研究突破对应用研究和工程技术发展的引领作用。通过引入以涡团运动为物理基础的湍流理论模式, 克服了经典混合长理论的局限性, 建立了新的流速分布、紊动强度、含沙量分布及水流阻力等解析公式, 克服了经典对数流速公式及Rouse公式在近壁区、水面存在的理论缺陷。建立的水流挟沙力公式不仅适用于一般挟沙水流挟沙力计算, 也适用于高含沙水流挟沙力的计算, 相关成果丰富了水力学及河流动力学学科内容, 促使黄河水沙运动、动床阻力及模型相似律等关键河流研究课题的理论突破, 加强了原型黄河分析的学术支撑, 对“三条黄河”建设颇有推动作用, 而且在工业管道输送、风沙治理、大气生态过程模拟及航空发动机能耗优化等领域也展现出良好的跨学科应用潜力。研究表明, 湍流基础研究的深化能够有效支撑系统级能效提升, 为能源转型、流域生态治理协同推进及应对气候变化提供重要的科学依据。

关键词:水流挟沙力公式; 涡团运动; 湍流基础研究; 能效提升; 水沙运动; 混合长理论

Advances in fundamental turbulence research and its promotion of applied research

ZHANG Hongwu, YANG Runyi, YU Wuyang, JIE Yongsheng, WANG Yanbo

(Yellow River Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the context of global climate change and the increasing frequency of extreme hydrological events, energy transformation and ecological governance impose higher demands on reducing energy consumption, improving system efficiency, and fostering new quality productive forces. Focusing on the core objectives of “scientific innovation” and “energy consumption reduction”, this study proceeded from fundamental turbulence theory and systematically elucidated the guiding role of fundamental research breakthroughs in applied research and engineering technology development. By introducing a turbulence framework grounded in the physics of eddy motions, the limitations of the classical mixing length theory were overcome, and new analytical formulations for velocity distribution, turbulence intensity, sediment concentration distribution, and flow resistance were derived, overcoming the theoretical deficiencies of the classical logarithmic velocity profile and the Rouse equation in the near-wall region and near the free surface. The proposed sediment-carrying capacity formula is applicable not only to ordinary sediment-laden flows but also to high-sediment-concentration flows. These results enrich the theoretical foundations of hydraulics and river dynamics, promote theoretical advances in key river research issues such as water-sediment transport in the Yellow River, mobile-bed resistance, and model similarity laws, strengthen the academic support for the analysis of the prototype Yellow River, and provide strong support for the construction of the “Three Yellow Rivers”. Moreover, the proposed framework

收稿日期: 2026-04-30 修回日期: 2026-05-21

作者简介: 张红武, 长聘教授, 国务院参事, 主要从事江河治理领域研究工作。E-mail: zhhw@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2024JBGS0016); 鄂尔多斯市水利科技重点基金资助项目(20232000090)。

demonstrates significant interdisciplinary application potential in areas including industrial pipeline transport, aeolian sand control, atmospheric and ecological process modeling, and energy-efficiency optimization of aero-engines. The findings indicate that advances in fundamental turbulence research can effectively support system-level energy-efficiency improvements, providing important scientific evidence for the coordinated advancement of energy transition, watershed ecological governance, and climate change adaptation.

Keywords: sediment-carrying capacity formula; eddy motion; fundamental turbulence research; energy efficiency improvement; water-sediment transport; mixing length theory

中图分类号: TV+O357.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)11-0001-15

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.11.001

一、引言

湍流问题是与能量损耗和流体传输效率密切相关的核心科学问题之一。湍流广泛存在于自然界与工程系统中,其一方面能够强化动量、热量和物质传递,另一方面又会显著增加摩擦阻力和能量耗散。因此,深入认识湍流机理,对于降低系统能耗、优化能源利用以及提高工程效率具有重要意义。长期以来,湍流问题被认为是经典物理学中最具挑战性的难题之一。诺贝尔物理学奖获得者理查德·费曼(Richard Feynman)将其称为“经典物理学尚未解决的重要问题之一”。尽管经过长期研究,人们对于该领域仍缺乏完善和统一的认识,这也成为制约流动预测、能耗控制与高效动力系统发展的重要理论瓶颈。

在全球气候变化与能源结构转型背景下,湍流研究的重要性进一步凸显。无论是风能高效利用、防洪减灾与流域治理,还是工业系统节能降耗与复杂流动优化,都对湍流机理认识与预测能力提出了更高要求。因此,加强湍流基础理论研究,不仅具有重要科学意义,也对提升能源利用效率、支撑绿色低碳发展以及增强气候变化适应能力具有重要现实价值。

二、湍流理论研究进展

1. 湍流理论研究现状

湍流广泛存在于天然河、大气及各类工程流场中,其在强化动量、热量与物质运输的同时,也会显著增加流动阻力与能量耗散,因此长期以来一直是流体力学中的核心科学问题之一。对于高含沙河流,复杂边界条件、水沙耦合作用及强非均匀流动结构进一步增强了湍流运动的复杂性。以黄河为代表的多沙河流,水流长期处于强湍动状态,在黄河“善冲、善淤、善徙”的演变过程中,其流速分布、能量交换及泥沙输运均表现出显著复

杂特征。因此,深入认识复杂湍流结构及其动力学机制,不仅是水力学及河流动力学研究的重要基础,也是进一步开展相关工程问题研究的关键前提。

现代湍流理论的研究起点通常可追溯至奥兹本·雷诺(Osborne Reynolds)于1895年提出的雷诺平均方法,他将流体流速分解为时均速度和脉动速度两部分,从纳维-斯托克斯方程导出了描述湍流平均运动的雷诺方程,并引入了反映脉动输运效应的雷诺应力项。然而,由于雷诺应力项中包含高阶脉动关联量,方程组无法直接封闭求解,由此形成著名的湍流封闭问题。围绕雷诺应力的合理表达,学界提出了众多近似理论,其中以路德维希·普朗特(Ludwig Prandtl)1925年在哥廷根水力学会议上提出的混合长假设和动量传递理论(以下简称混合长理论)影响最为深远。

混合长理论的基本思想是将流体微团的脉动输运过程类比分分子运动中的平均自由程,通过引入“混合长度”建立脉动特性与时均速度梯度之间的联系,从而构造湍流切应力表达式。当时普朗特只认为“在壁面附近,混合长与距壁面的距离 z 成正比”,但没给出具体的比例系数,也没有推导出对数速度分布。在此基础上,他的学生冯·卡门(von Kármán)于1930年的斯德哥尔摩应用力学大会提出紊流局部相似理论,引入卡门常数 κ ,推导得到对数形式的流速分布公式(以速缺形式表达):

$$\frac{u - u_m}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \left[\ln \left[1 - \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \right] + \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \right] \quad (1)$$

式中, u 为垂直坐标 z 处的紊流时均流速(m/s), u_m 为最大流速(m/s), u_* 为摩阻流速(m/s), h 为水深(m)。

1932年,尼古拉兹(Nikuradse)完成了著名的光滑和粗糙管道流实验,系统验证了湍流边界层的对数速度分布律的正确性。随后在1933年,普朗特独立发表1932年推导的对数律。需要指出的是,通过普朗特

混合长模式,并结合混合长线性分布假设(即 $l=\kappa z$, κ 为卡门常数, l 为混合长)可推导得到另一形式的对数流速公式:

$$\frac{u-u_m}{u_*}=\frac{1}{\kappa}\ln\frac{z}{h} \quad (2)$$

进一步引入积分常数 C 后,式(1)和式(2)可表示为统一的对数形式:

$$\frac{u}{u_*}=\frac{1}{\kappa}\ln z+C \quad (3)$$

在此基础上,爱因斯坦(H. A. Einstein)结合尼古拉兹圆管实验和库利根(Keulegan)明渠研究,通过引入校正系数 χ ,建立了适用于不同壁面粗糙条件的统一垂向流速分布公式(以下简称Einstein公式):

$$\frac{u}{u_*}=5.75\log\left[30.2\frac{z\chi}{k_s}\right] \quad (4)$$

式中, k_s 为边界粗糙突起的高度(m)。对其沿水深积分后,可进一步得到垂线平均流速 U 表达式:

$$U=5.75\sqrt{gR_b'J}\lg\left[12.27\frac{\chi R_b'}{k_s}\right] \quad (5)$$

式中, g 为重力加速度, R_b' 是沙粒阻力对应的水力半径(m)。

表1详细梳理了上述公式的发展历程、物理假设及相关评述。总的来说,尽管这些模型在表达形式与参数处理上存在差异,但本质上均建立在涡黏性假设与混合长度概念基础之上,属于同一类半经验湍流理论。

经典混合长理论在工程实践中取得了广泛应用,并成为后续多种半经验湍流模式的重要理论基础。然而,其理论局限性也始终未得到根本解决。首先,在物理机制上,混合长理论建立在局域平衡与局域输运假设基础之上,而实际湍流运动往往具有明显非局域特征。流体微团在脉动输运过程中,会同时伴随主流方向的大尺度位移,其运动范围与动力学状态均难以简单归结为局部平均速度梯度控制。其次,混合长本身

通常依赖经验确定,其物理含义、尺度属性及适用条件至今仍缺乏统一认识,亟须进行完善。此外,作为混合长模型的重要基础理论成果,对数流速分布公式在数学性质上也存在问题。例如,其从理论上在壁面附近存在函数奇点,同时在流速最大的水面(或管道轴心)处流速梯度不为0,这里出现流速极值在数学上是无法解释的,与实际流动特征也不一致。

为改善经典混合长理论在复杂流动中的适用性,后续研究围绕雷诺应力封闭问题展开了大量探索。早期研究仍以涡黏性假设为基础,在零方程代数模型的基础上,通过引入湍动能输运方程、耗散率方程等,逐步发展出一方程模型以及以 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 为代表的两方程湍流模型。这类模型通过增加湍流特征参数的输运描述,提高了对非均匀流动与复杂边界条件的适应能力。

不过,上述模型本质上仍建立在布辛涅司克(Boussinesq)涡黏性假设基础之上,即假定雷诺应力与时均速度梯度之间满足类似牛顿内摩擦的线性关系。这种假设在强曲率流动、旋转流动、分离流动及高含沙复杂水流中往往难以成立,也是 ε 方程模型不准确的原因之一,给出的模拟结果相当不精确。为进一步描述湍流各向异性特征,研究者随后发展了雷诺应力输运模型等二阶封闭理论,直接建立各雷诺应力分量的输运方程,以期提高对复杂湍流结构的描述能力。然而,该类模型的压力应变项、耗散项及高阶关联项仍需借助经验假设进行封闭,理论复杂性与计算难度显著增加,其普适性问题至今尚难以解决。

与此同时,随着实验测量与数值计算技术的发展,人们逐渐认识到湍流内部存在明显的拟序结构与多尺度运动特征。相干结构理论、大涡模拟(LES)及直接数值模拟(DNS)等方法的发展,使研究对象逐渐从经验封闭模型扩展至湍流结构本身;这些方法尝试从能量级联、多尺度演化等角度解释湍流形成与发展机制,在一定程度上推动了人们对湍流动力学过程的认识。

表1 承认普朗特混合长理论的流速分布公式对比

公式	发展历程	物理假设	评述
普朗特	采用混合长线性分布假设;以速缺律呈现	普朗特混合长理论, $l=\kappa z$	壁面处存在函数奇点;流速最大处梯度不为0;管道对称轴处导数不连续
冯·卡门	采用冯·卡门湍流自相似理论;以速缺律呈现	普朗特混合长理论, $l=\kappa\left(\frac{du}{dz}\right)/\left(\frac{d^2u}{dz^2}\right)$	壁面处存在函数奇点;流速最大处梯度不为0;管道对称轴处导数不连续
爱因斯坦	在已有对数律公式基础上结合尼古拉兹和巴赞等实测资料率定积分常数;以壁面律呈现	普朗特混合长理论,引入校正系数	壁面处存在函数奇点;流速最大处梯度不为0;管道对称轴处导数不连续
张红武	基于湍流涡团模式确定混合长度;以速缺律和壁面律呈现	涡团模式, $l/h=c_1\sqrt{z/h}$	不存在函数奇点;流速最大处梯度为0

但对于高雷诺数复杂湍流而言,目前仍难以建立统一且较为严格的理论描述框架。

总体而言,湍流封闭问题至今尚未得到根本解决:两方程模型仍依赖涡黏性假设,雷诺应力模型仍需经验封闭;LES与DNS方法在高雷诺数、大尺度复杂工程流动时,纳维-斯托克斯方程中的核心非线性项会占据更大权重,将导致涡拉伸增强、涡破碎更剧烈、尺度间耦合更复杂、小扰动快速放大,从而表现出强随机性、强间歇性、强非高斯特征、更复杂的耗散结构,对此进行实验模拟和数值模拟都更加困难,很难加以理论描述,其计算成本也限制了应用。

进一步分析发现,现有多数湍流模型虽然在数学形式与计算层次上不断发展,但其核心仍涉及湍流动量交换机制的合理表达问题,而混合长概念正是这一问题最早且最典型的理论表述之一。因此,混合长理论并非仅是早期零方程模型中的经验假设,其本质上反映的是湍流脉动输运尺度与动量交换机制之间的内在联系,核心优势是其物理机制最清晰直观。对于大尺度工程水流而言,零方程模型及其相关流速分布理论由于具有结构简洁、参数较少以及计算效率较高等特点,至今仍被广泛应用于水力学及河流动力学研究之中。因此,在现代湍流理论与数值方法持续发展的背景下,重新审视混合长的物理意义及其合理表达形式,不仅有助于深化对湍流输运机制的认识,也可为复杂条件下的流速分布与泥沙输运研究提供新的理论基础。

2. 湍流基础研究进展

针对混合长理论存在的诸多问题,张红武1985年以河工模型几何变态问题研究为题攻读硕士学位时,为了从理论上论证模型几何变态后对流速沿水深分布相似的影响,从具有明确物理图形的涡团运动出发,逐渐创建了涡团模式。即在恒定、均匀二维紊流流场中,任一点都存在一个具有固定角速度的涡团,其当量直径等于此处涡体垂向运移过程中能够保持原有流动特征的距离,即混合长 l 。根据涡团的转动动能和势能的相关关系,推导得到混合长分布公式如下。

$$\frac{l}{h} = c_n \sqrt{\frac{z}{h}} \quad (6)$$

式中, c_n 为涡团参数,清水时取0.15。通过天然河流与水槽实验数据率定,还可得到其随含沙量 S_v 的变化关系式:

$$c_n = 0.15 [1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v)] \quad (7)$$

将式(6)代入普朗特混合长表达式,可得如下的

流速梯度分布式。

$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{c_n} \sqrt{\frac{h-z}{h^2 z}} \quad (8)$$

以时均流速在水面处达到最大值 u_m 为积分条件,对上式积分,可解出速缺形式的涡团模式垂向时均流速分布公式:

$$\frac{u_m - u}{u_*} = \frac{\pi}{2c_n} - \frac{1}{c_n} \left[\arcsin \sqrt{\frac{z}{h}} + \sqrt{\frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right)} \right] \quad (9)$$

根据式(8)和式(9),可以发现,基于涡团模式的流速分布公式在河底处(z 接近0)仍可给出具有实际意义的量值,同时在水面流速最大处($z=h$)流速梯度恰为0。这表明,该公式能够克服经典对数流速分布公式在数学性质上的缺陷。除此之外,通过尼古拉兹圆管资料的验证也发现,涡团模式给出的混合长分布比普朗特的线性假设更接近真实情况。不难看出,涡团模式起初是为了解决混合长的合理确定问题,后来逐渐建立涡团运动图形后,其图形乃至混合长的物理含义既与普朗特的动量传递理论存在区别,同时又没有产生矛盾,类比分子运动中的平均自由程,同样也可以给出类似于普朗特的紊动剪切力形式,从而成功克服了混合长理论的缺陷,为湍流流速分布解析表达方面提供了一种结构简洁、参数较少、物理图形明确、便于工程计算的理论方法(见表1)。

近两年杨润祎与张红武利用尼古拉兹和舍列维夫的实验资料,分别建立了人工粗糙管和工业输水管中积分常数 C 与相对粗糙高度及粗糙雷诺数 $Re_* = \frac{u_* z}{\nu}$ (ν 为流体运动黏度系数)之间的函数关系[见式(11)],采用相关资料对式(10)(称为“张红武公式”)和式(4)(Einstein公式)进行验证。其验证结果表明(见图1),Einstein公式在各流区的验证精度均低于式(10)(见表2)。

$$u = \frac{u_*}{c_n} \left[\arcsin \sqrt{\frac{z}{h}} + \sqrt{\frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right)} + C \right] \quad (10)$$

$$C = \begin{cases} -0.09 \ln^2(Re_*) + 0.49 \ln(Re_*) + 0.37 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 0.76, & 0 < Re_* \leq 11.6 \text{ (人工管)} \\ -0.02 \ln^2(Re_*) + 0.07 \ln(Re_*) + 0.37 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 0.13, & 11.6 < Re_* \leq 70 \text{ (人工管)} \\ 0.37 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 0.27, & Re_* > 70 \text{ (人工管)} \\ -0.05 \ln^2(Re_*) + 0.75 \ln(Re_*) + 0.39 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 3.14, & \text{(生铁管)} \\ -0.05 \ln^2(Re_*) + 0.47 \ln(Re_*) + 0.39 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 1.67, & \text{(有接头钢管)} \\ -0.07 \ln^2(Re_*) + 0.85 \ln(Re_*) + 0.39 \ln\left(\frac{r}{k_s}\right) - 3.00, & \text{(无接头钢管)} \end{cases} \quad (11)$$

除此之外,将流速公式沿过水断面进行积分,可以推导得到阻力系数和公式积分常数之间的关系式。采用舍列维夫的圆管实验资料,对张红武公式和

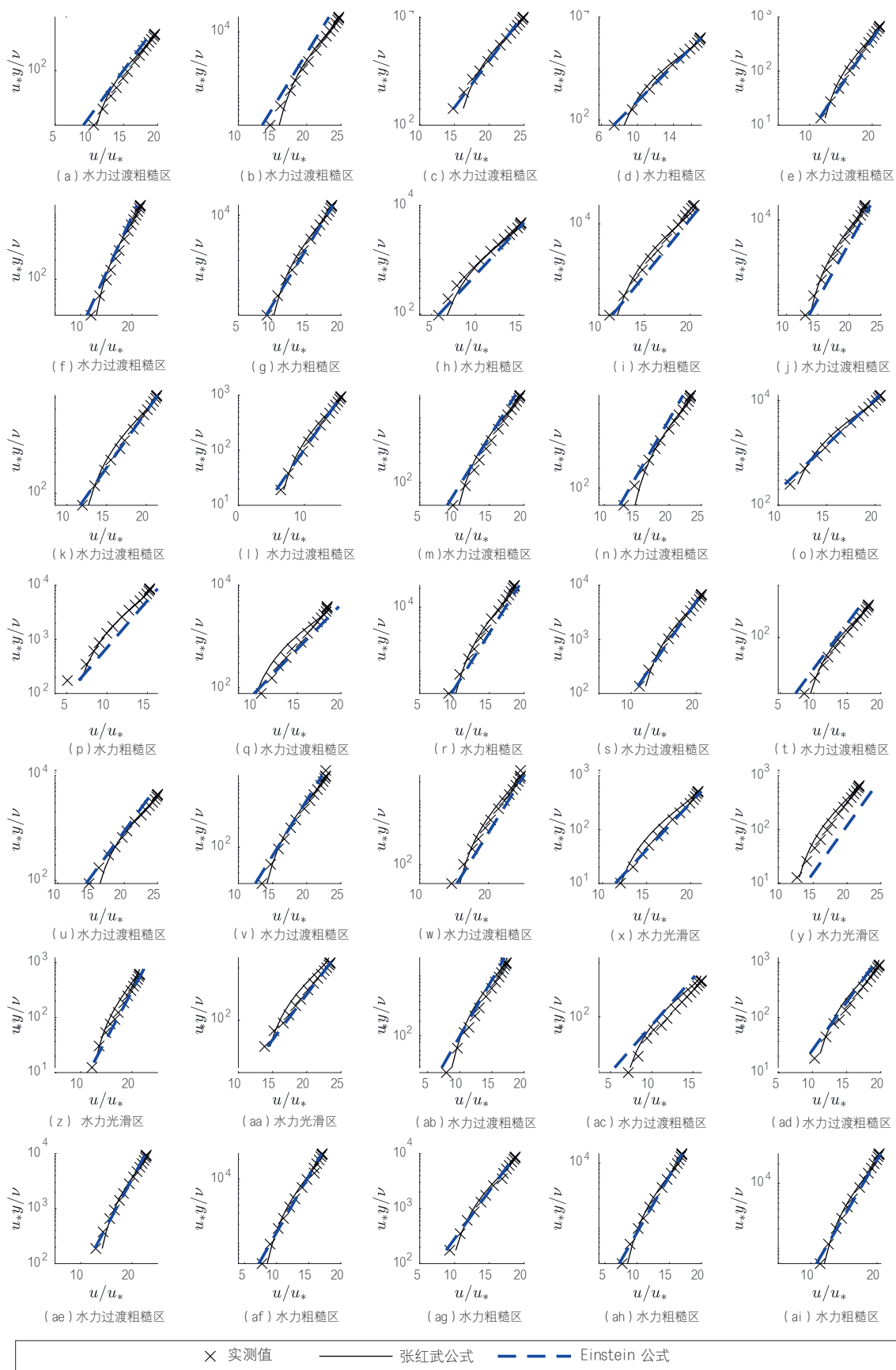


图1 对涡团模式流速垂线分布公式的系统检验

Einstein 公式的阻力关系进行的验证表明(见图2), 利用实测资料进行积分常数关系率定后的涡团模式流速公式, 在阻力关系预测上的表现要优于经典对数公式。值得注意的是, 图2(b)中的 Einstein 公式对应的阻力系数计算曲线相交严重且交点较多, 似说明基于经典的混合长理论建立的阻力系数计算式, 不太适合描述工业输水管摩阻特性。

三、湍流基础研究对应用研究的推动

1. 对水力学及河流动力学的推动

湍流基础研究的价值不仅体现在对湍流结构和运动机制的解释上, 也体现在对相关工程学科问题的分析能力和计算方法所产生的推动作用上。涡团模式及其相关成果形成后, 被本文第一作者进一步引入水力学及河流动力学领域, 用于解释悬移质扩散、湍动强度分布、弯道环流、含沙水流阻力以及水流挟沙力计算等

问题。相关研究明显拓宽了传统河流动力学公式的工程适用性, 为复杂水沙条件下的河流动力学发展提供了新的理论基础和计算途径。

在湍动强度分布方面, 借助湍流涡团模式和脉动流速概率分布关系, 建立了纵向和垂向湍动强度沿垂线分布的表达式:

$$\sigma_x = 1.68 \left(\frac{h}{z} \right)^{0.11} \sqrt{\frac{1-z/h}{1+e^{-z/k_s}}} u_* \quad (12)$$

$$\sigma_z = 1.46 \left(\frac{z}{h} \right)^{0.14} \sqrt{(1+e^{-z/k_s}) \left(1 - \frac{z}{h} \right)} u_* \quad (13)$$

式中, σ_x 和 σ_z 分别为纵向和垂向紊动强度。

进而分析浑水紊动强度的分布规律, 明晰了水流含沙后紊动强弱变化的认识。梁再潮和惠遇甲、李义天、胡春宏等学者的研究表明, 上述公式理论基础较为坚实, 是当下与实测资料吻合最好的计算公式之一, 可作为湍动强度分布研究中的定量计算依据。此外,

表2 对涡团模式流速垂线分布公式系统检验资料的概况

资料来源	样本数	管道类型	管道直径 d (cm)	雷诺数 R_e	阻力系数 λ
舍维列夫	153	工业输水管	52.00~302.00	47 600~669 000	0.0161~0.0401
舍维列夫	77	人工粗糙管	25.90~104.90	17 579~286 417	0.0357~0.0498
尼古拉兹	697	人工粗糙管	2.41~9.94	4266~1 018 600	0.0178~0.0610

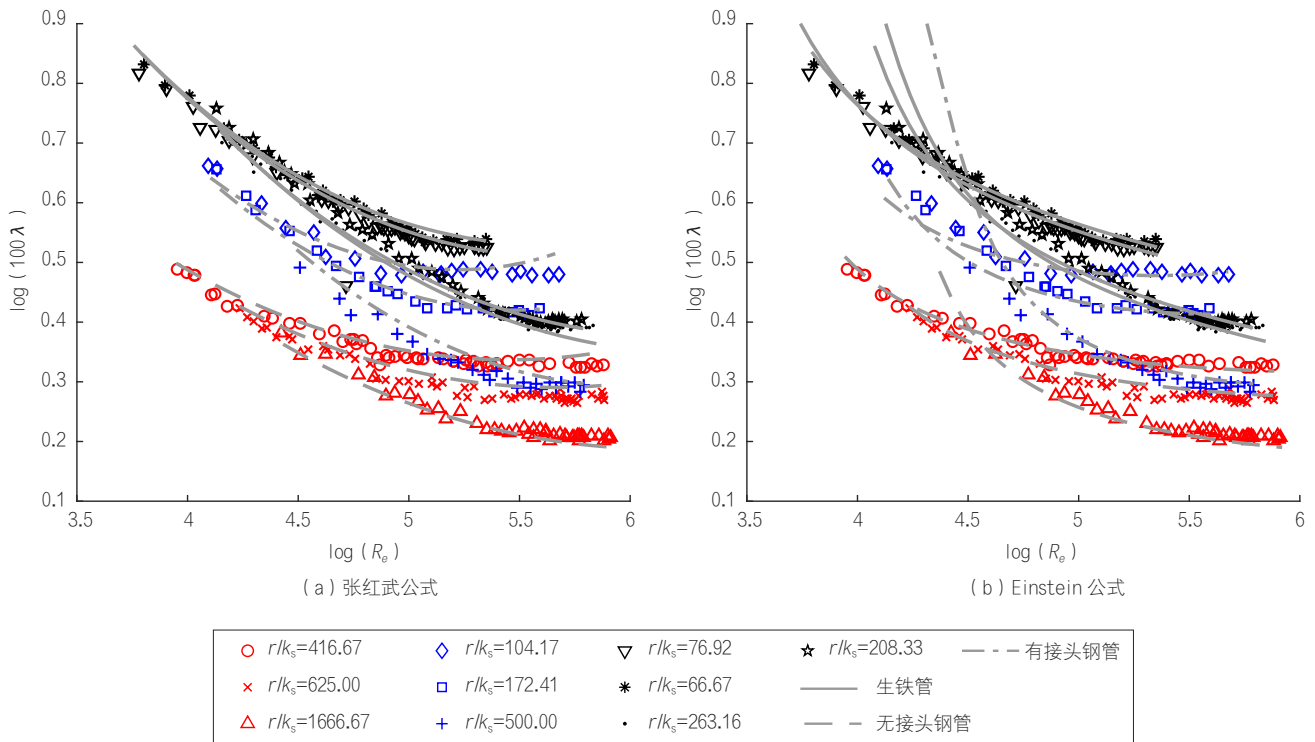


图2 涡团模式与对数公式阻力系数公式验证结果

本文第一作者还分析了浑水条件下湍动强度的分布特征,讨论了水流含沙后湍动强弱变化的机理问题,从而为认识泥沙运动对湍流结构的影响提供了理论依据。

在弯道环流研究方面,相关工作进一步考虑弯道水流中环流运动对涡团转动动能的影响,并在此基础上求解横向流速方程,建立了适用于光滑和粗糙河床条件的弯道横向流速分布公式:

$$v_r = 86.7 \frac{V_{cp} h}{r} \left[\left[1 + 5.75 \frac{g}{C^2} \right] \eta^{1.857} - 0.88 \eta^{2.14} + \left[0.034 - 12.5 \frac{g}{C^2} \right] \eta^{0.857} + 4.72 \frac{g}{C^2} - 0.088 \right] \quad (14)$$

式中, v_r 是相对水深 η ($\eta = z/h$) 处的横向流速 (m/s), V_{cp} 是纵向垂线平均流速 (m/s), r 是流场柱坐标分量 (m), C 是谢才系数 ($m^{0.5}/s$)。该公式将弯道水流的横向流速与水流阻力、水流强度及环流结构联系起来,首次以解析形式对弯道水流运动进行了准确的刻画。与罗索夫斯基公式等经典成果相比,该式避免了非有限形式积分带来的繁琐图表查算流程,解决了传统公式床面切应力与流速同向的物理图式错误。因此,该式及相关环流沿程分布等公式后来被《水力计算手册(第二版)》推荐使用,显示出其在工程水力计算中的应用价值。

在悬移质垂线分布方面,将前述流速梯度表达式代入悬移质扩散方程,可以得到含沙量沿垂线分布的解析公式:

$$s = s_a \exp \left[\frac{2\omega}{c_n u_*} \left[\arctg \sqrt{\frac{h}{z} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{h}{a} - 1} \right] \right] \quad (15)$$

式中, ω 为泥沙沉速 (m/s), s 为垂线某处的含沙量, s_a 为垂线参考点的含沙量。上式首次以解析形式表达含沙量沿垂线的变化规律。与经典 Rouse 公式相比,该公式在处理水面及近床区域含沙量分布时具有一定改进意义,可避免传统表达中水面含沙量趋零、近床区含沙量不合理发散等由混合长理论引起的问题。

上述成果问世后,引起了学界的关注。例如,孙东坡利用式(6)及式(14)推导路线获得新的环流流速分布计算式;郑邦民等在讨论紊动扩散系数时,以式(15)作为比较标准;汪富泉、丁晶、曹叔尤等1998年发表的悬移质含沙量沿垂线的分布公式,被权威教科书称为“汪富泉、丁晶公式”,实际这是式(15)在数学上完全等价的另一个求解式形式,在1993—1994年的一些教材和专著中早有介绍;罗诗琦等基于式(15)构建了泥沙扬动流速公式。此外,本文作者采用工业管流速公式和水流连续方程,在给定流量、河宽及泥沙粒径等条件下,对水深和流速进行闭合求解,在有限的资料条件下实现了对黄河下游阻力的合理描述(实测资料的验证结果见图3),从而表明,将湍流基础理论引入阻力和输沙计算,有助于减少以往单纯依赖经验处理或水力因子分割假定所带来的不确定性,并为黄河等复杂含沙河流的阻力计算提供了更具物理基础的分析方法。

除湍动强度、环流流速和含沙量分布等外,湍流基础研究对水流挟沙力计算也产生了重要影响。本文第一作者早期从水流能耗平衡出发,将流速梯度与挟沙能力联系起来,建立了水流挟沙力公式:

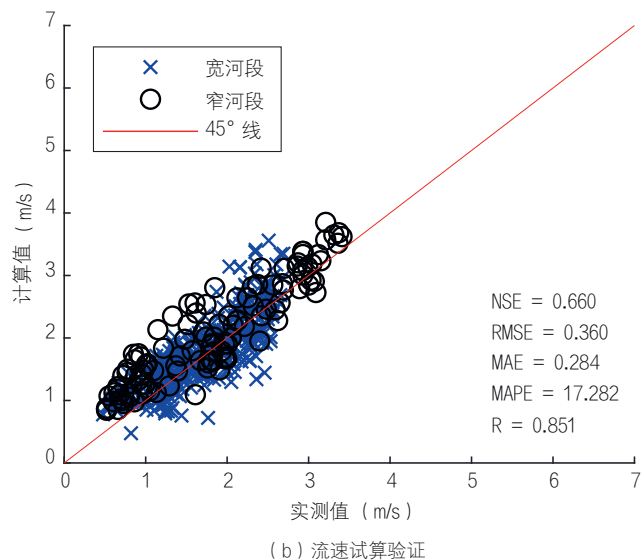
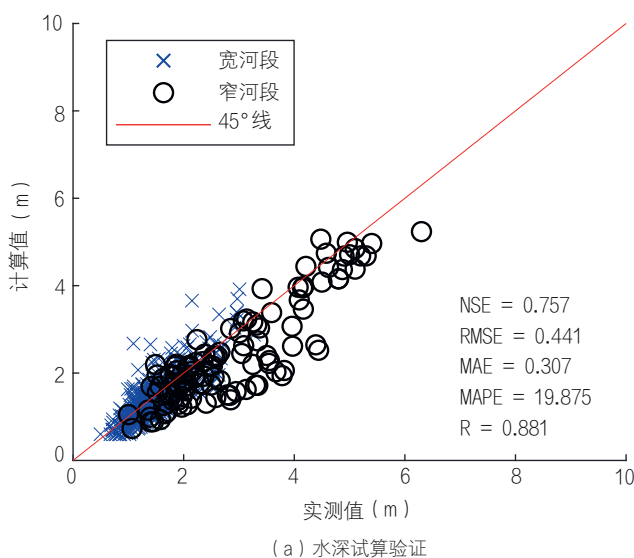


图3 由涡团模式流速公式计算水深与流速的验证结果

$$S_* = 0.14 \left[\frac{V^3}{gh\omega_0} \ln \left[\frac{h}{6D_{50}} \right] \right]^{0.62} \quad (16)$$

式中, ω_0 为非均匀泥沙在清水时的平均沉速 (m/s), D_{50} 为床沙中径 (m)。与传统公式相比, 该表达式不仅考虑了水流动力条件, 也将相对粗糙度 (通过 h/D_{50} 项反映) 纳入挟沙力计算, 从而提高了公式对复杂河床条件的适应能力, 成为 20 世纪 80 年代精度最高的挟沙力公式。

1991 年, 为提升针对黄河治理紧迫需求而开展的大规模模型实验的模拟精度, 在上式基础上, 根据挟沙紊流能耗原理导出更为完善的挟沙力公式:

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_v) V^3}{\kappa_1 \left[\frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} \right] gh\omega_s} \ln \left[\frac{h}{6D_{50}} \right] \right]^{0.62} \quad (17)$$

式中, γ_s 为泥沙容重 (kg/m^3), γ_m 为浑水容重 (kg/m^3), κ_1 、 ω_s 分别为浑水卡门常数 (由此可知浑水条件下卡门常数并非常数) 及泥沙群体沉速 (m/s), 由以下两式计算:

$$\kappa_1 = \kappa [1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v)] \quad (18)$$

$$\omega_s = \omega_0 (1 - 1.25 S_v) \left[1 - \frac{S_v}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right]^{3.5} \quad (19)$$

式中, d_{50} 为悬沙中径 (mm)。

式(17)~式(19)的意义在于, 它们合理将含沙量、泥沙群体沉速、卡门常数、浑水容重及床沙粒径等水沙因子对挟沙力的影响加以全面表达, 为高、中、低含沙量条件下的挟沙力计算提供了统一的计算公式, 改善了传统公式计算精度低、尤其在含沙水流条件下适用性不足的问题。该组公式的提出对黄河模型相似律的构建起到了巨大的推动作用, 并成功应用于黄河干支流及其他流域相关河流的河工模型设计实践。随后, 一些教科书、专著、工具书相继对该挟沙力公式进行推荐, 特别是 1995—1998 年张瑞瑾、谢鉴衡、王明甫等编著的教科书对该公式大力推荐, 使之在学界得到进一步认可。时至今日, 武汉大学主编的高校水利学科专业规范核心课程教材及河海大学编著的港口航道与海岸工程专业教材《河流动力学》, 均评价该公式“经包括了黄河、长江、渭河、辽河及美国 Muddy River 等河流实测资料的验证, 实测资料的含沙量变化为 $0.15 \sim 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 计算值与实测值符合较好, 该公式不仅适用于一般挟沙水流挟沙力计算, 也适用于高含沙水流挟沙力的计算”。后来还有一些学者参照该公式结构形式建立了数个新的挟沙力公式。王彦博的

计算分析结果表明, 含沙量是影响各高含沙水流挟沙力公式的重要因子, 但由于细部结构的差异, 唯有式(17)在大量实测资料验证时有良好的表现; 此外, 王彦博以流量、河宽、含沙量、泥沙粒径等河流规划设计易知的条件为基础, 借助水流连续方程及式(10)、式(17), 依次推算水深、流速和挟沙力等因子, 为实测资料不足河流的水沙运动、挟沙能力计算和冲淤判断提供了新途径。

从河流动力学角度看, 挟沙力公式不仅是单一水沙参数的计算工具, 也是河床演变分析和冲淤模型构建中的关键。式(17)通过引入对含沙量有直接或间接影响的物理量, 为解释黄河“多来多排”“高含沙洪水揭河底”等特殊现象提供了定量计算依据, 使原型黄河资料分析有了系统理论的支撑。在此基础上, 1993 年出版的《弯道水力学》进一步给出了水沙运动、河床冲淤变形方程及相关关键补充方程。这些方程与前述挟沙力公式相结合, 使复杂河道条件下的水沙运动和河床演变模拟具有更明确的理论支撑, 减少了单纯依赖实测数据反调参数或人为修正水流挟沙力公式系数的倾向, 增强了模型参数的物理可解释性。

综合来看, 湍流基础研究对原型黄河、数字黄河、模型黄河“三条黄河”建设颇具推动作用。

2. 湍流基础研究的多学科应用价值

通过涡团模式对混合长的物理含义及其计算方法取得进展后, 不仅可以建立计算精度更高的流速分布、湍动强度分布等公式, 从而推动水力学及河流动力学的发展, 也为相关工程领域的多学科应用提供了新的计算途径和技术支撑。

(1) 黄河保护与水沙调控中的应用

在黄河保护和水沙调控领域, 上述基础研究首先为高含沙水流判别和输沙水量优化提供了理论支撑。由涡团参数计算式(7)可知, 含沙量 $S > 200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 与 $S < 200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时的流速图形变化规律是迥然不同的, 因此现在多视 $S=200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 作为黄河一般挟沙水流和高含沙水流的分界标准, 改变了早期 $S=500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的分界标准。

这一认识对于黄河水沙优化调控具有直接意义。通过揭示不同含沙量条件下流速分布与输沙能力之间的关系, 可以更合理地估算维持输沙所需水量, 进而为减少不必要的输沙耗水、提高水资源利用效率提供依据。在黄河流域生态保护和高质量发展背景下, 这类研究不仅有助于下游河道输沙和河槽稳定, 也可为中

上游生态用水配置、跨流域调水以及关键河段治理工程提供科学支撑。

以黄河下游输沙需水量研究为例,基于1960—2020年实测水沙资料的分析表明,输沙需水量不仅与来水量、来沙量及二者配比有关,还与河道含沙量变化、河道边界形态及床沙中值粒径等因素密切相关。在相同量级的来水量和来沙量条件下,黄河下游仍可能表现出不同的冲淤状态,说明河床冲淤并非单纯由水沙组合决定,而是受含沙量、河床边界条件和河道调整过程的共同影响。因此,要获得较为经济的输沙水量,含沙量应处于适宜的阈值范围内,河道边界也应保持相对稳定的形态。

从河床边界条件看,黄河下游近年来来沙量减少、河道整治程度提高,床沙粗化和悬沙中径增大等现象逐渐显现。相关资料显示,黄河下游宽河段床沙中径平均值由1992年以前的约0.10 mm增至2006年后的约0.125 mm;游荡段河床比降也随河道调整发生变化。床沙粗化和床面阻力增大,会在一定程度上降低相同过流能力下的水流挟沙能力,从而影响输沙效率。这表明,输沙需水量计算不能仅考虑水沙来量,还应将河床边界、床沙粒径和河槽形态纳入统一分析框架。

在计算方法上,可将上文介绍的运动方程、阻力公式和水流连续方程、河相关式相结合,组成闭合方程组,求解冲淤平衡条件下的流速、水深、河宽和糙率,并进一步采用式(17)计算平衡状态下的挟沙能力。由此可建立体现水沙自动调整作用的输沙需水量计算方法,用以估算给定造床流量条件下维持主槽均衡所需的汛期输沙水量。

以近期主槽条件为例,当以维持黄河下游河段造床流量 $Q=4000\text{ m}^3/\text{s}$ 为目标,并分别给定花园口站来沙量为2亿、3亿、4亿、6亿、8亿t时,计算得到的输沙需水量分别约为133.25亿、184.73亿、226.89亿、286.12亿和313.60亿 m^3 ;折合单位输沙需水量分别约为66.63、61.58、56.72、47.69和39.20 m^3/t (见图4)。计算结果表明,随着来沙量减少,总输沙需水量虽然降低,但单位泥沙输送所需水量反而增大,说明低含沙条件下水流输沙效率下降,而较高含沙量条件下水流挟带泥沙的能力更强。这一结果从定量角度揭示了黄河下游来水来沙配比对输沙效率的制约作用,也说明输沙水量优化的关键不只是“减少用水”,更是寻求适宜的

水沙组合和含沙量阈值。

进一步比较不同河道治理程度下的计算结果可以发现,河床稳定性提高有助于降低同等重量泥沙的输沙需水量。随着河道整治程度提高,河槽宽深比趋于减小,冲积河流形态逐渐向相对窄深、稳定的方向发展。在相同平滩流量、床沙中径和床面比降条件下,河宽越小、河床形态越稳定,相同来沙条件下所需输沙水量越少。这表明,河型越接近稳定弯曲型,越有利于河道搬运泥沙,也越有利于节约输沙用水。

因此,湍流基础研究和水流挟沙力公式在黄河保护中的应用,并不仅限于给出某一水力参数的计算结果,而是可以进一步服务于水沙调控、河道整治和生态用水优化。当前,张红武开展的“变流护滩船坝”试验工程,正试图利用船头导流屏形成的立轴“涡团”带动构件的周期性运动,进而通过电磁感应装置转化为电能。通过控导工程引导河势向更加稳定的方向发展,改善河槽形态和输沙边界条件,可在提高输沙效率的同时减少不必要的河道输沙耗水。由此可见,湍流基础研究成果为黄河下游水沙调控和生态保护中的工程决策提供了依据。

(2) 工业管道输送中的应用

湍流基础研究对工业领域中的固液两相流输送研究也具有直接的促进作用。管道输送不仅是工业领域的基础设施,更是现代工业体系高效运转的基石。在矿浆、泥浆等管道输送系统中,流体能耗、摩阻特性和输送浓度是影响系统效率的关键因素。基于上述含沙水流阻力、流速分布和挟沙力计算公式,可以将颗粒粒径、输送距离、电机功率、管道条件和运行浓度等因素纳入统一计算框架,从而为管道输送

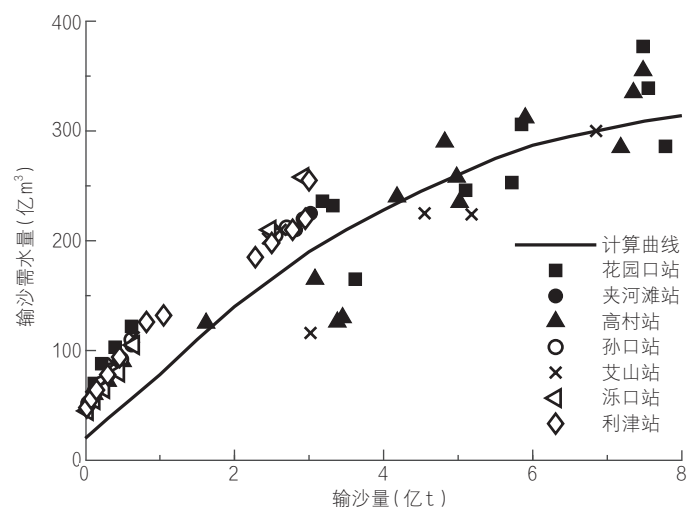


图4 黄河下游输沙量-输沙需水量关系曲线(以造床流量为 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 为例)

系统优化提供依据。

举例而言,在位于内蒙古包头的世界最大稀土工业基地,针对供水和铁精矿浆管道输送系统,根据管道湍流输送能耗及摩阻特性,结合铁精矿特殊粒度分布、输沙距离和电机功率等约束条件,通过式(17)~式(19)求解,建立了管道高效输送计算系统,并确定了最优的输送临界流速、浓度等参数。相关应用表明,当设计浓度确定为65%时,管道输送效率得到提高,工程运行取得良好的经济效益。黄河下游山东段淤背固堤和淤筑村台利用的高效输沙技术也与此原理及方法相同。这种适用于高寒地区的高扬程、大口径、长距离管道输水技术后来被鉴定为国际领先水平,于2012年获内蒙古自治区科学技术进步奖一等奖。

此外,在高浊度水管道混凝过程中,水体通常处于湍流状态。给排水工程设计中需以流体紊动的平均流速梯度 G 代表管道混凝反应强度,而传统的 G 表达式采取流体为层流的假定,且存在数学推导错误。基于涡团模式给出的流速梯度表达,可推导出与实验结果相符的 G 值计算公式,结合混合反应时间 T ,可得出高浊度水管道混凝的最佳 GT 值。这一方法对高效使用混凝剂、保证出水水质和优化水处理工艺意义很大。

(3) 风沙治理与阻沙控沙工程中的应用

在风沙治理领域,边界粗糙度、近地风速和紊动强度是解释风蚀、沙粒起动和沙丘移动的重要基础。由式(12)、式(13)可知,地表粗糙度增大时,纵向和垂向紊动强度会相应减小。此时,减风阻沙的表现会越来越明显,使得风蚀作用下沙粒的稳定性增强。

进一步地,若采用式(9)计算平均流速与底部泥沙起动流速的关系,可得出泥沙统一起动流速公式〔式(20)〕。与部分传统公式相比,该公式能够更合理地反映地表粗糙度和容重对沙粒起动的的影响,并可用于解释细颗粒、轻质沙条件下传统公式计算偏差较大的问题。基于式(20)计算可知,土壤起动阈值与地表粗糙度之间存在正相关关系,这为理解黄土高原林草植被的减沙作用提供了理论依据。

$$V_c = 2.1K_D \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD + 6.59 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g^{0.33} \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_c} \right)^{6.6} \frac{v^{1.34}}{D} + 0.0352 \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_c} \right)^{6.6} \frac{gh\delta_1}{D} \right] \quad (20)$$

$$\frac{u_d}{V} = 1 - \frac{3\pi}{8c_n} \frac{\sqrt{g}}{C} + \frac{\sqrt{g}}{C c_n} \left[\sqrt{\frac{2D}{3h}} - \left[\frac{2D}{3h} \right]^2 + \arcsin \sqrt{\frac{2D}{3h}} \right] = K_D^{-1} \quad (21)$$

式中, V_c 是起动流速, D 是泥沙粒径, γ' 是淤积物干容重, γ'_c 是淤积物稳定干容重, u_d 为水流底速, C 为谢才系数, δ 为薄膜水厚度, V 为垂线平均流速。

对于自然沙漠而言,若地表粗糙度较小,沙粒起动风速阈值较低,地表风蚀和风沙活动容易增强,而在地表设置沙障或其他阻控结构后,边界粗糙度增大,不仅可以提高沙粒起动风速,还能降低近地层风速。在减风阻沙双重影响下,地表风沙活动强度明显削弱。由此可以从理论上解释沙障阻控风沙的技术原理:通过增加地表阻力和提高沙粒起动阈值,降低风沙流活动性,从而抑制沙丘移动和扩展。此外,若将阻控工程表层设置为光滑面,则可使沙粒不能在沙丘顶部沉积,进而遏制沙丘移动和扩展。

基于含沙量垂线分布公式和相关输沙计算方法,余午阳、张红武等对沙漠风沙流中近地层输沙量分布进行了估算。研究首先计算近地表一定厚度范围内的悬移质泥沙量和推移质输沙量,再将不同高度范围内的输沙量分别统计。结果表明,在沙漠区挟沙气流中,90%以上的输移沙粒集中在距地表30 cm高度范围内。因此,沙障工程高度原则上应大于30 cm,以有效拦截主要输沙层内的沙粒运动。

在具体工程设计中,还可结合泥沙堆积休止角的概念,选择适宜的阻控结构型式和表面材料,通过降低沙粒在沙丘表面的持续堆积和推移能力,限制沙丘移动与扩展。本文第一作者带领的团队基于上述发现,成功研发并实施了一系列能遏制沙丘移动和扩展的阻控工程,实现应用研究和创新技术成果落地。

(4) 大气生态治理中的应用

在大气生态治理中,风速和含沙量的垂向分布是描述风沙活动强度的重要参数。余午阳、张红武运用湍流基础研究进展,构建了风速与含沙量垂向分布计算方法,并将其用于沙尘暴源区风沙因子垂线分布规律研究。其中,式(10)能够明确反映底部粗糙度对流速分布的影响,因此可用于不同下垫面条件下风沙运动中风速分布的计算,其结果如图5所示。与经典公式相比,明确底部粗糙度影响的公式对地表特征变化更加敏感,能够更清楚地量化不同下垫面对近地风速结构的影响。对于沙尘暴源区而言,实测风速廓线资料往往有限,观测条件也较为复杂,因此这类计算方法具有较高的实际应用价值,不仅可用于识别不同类型下的风沙活动差异,也可为沙尘暴预报、生态修复效果评估和气候变化模型参数化提供支撑。

(5) 风电开发与高空风能利用中的应用

湍流基础研究对于新能源领域,特别是风力发电技术提升,也具有重要应用潜力。湍流是一种高度复杂的流动形式,其不规则性和随机性会影响风力发电机组的运行稳定性、能量捕获效率和机组布置方式。风速和风向在时空上的紊动特征,是影响风能捕获装置性能的关键物理参数。

前述关于风沙因子垂线分布的定量描述,以及式(12)、式(13)给出的不同粗糙度条件下不同高度气流紊动强度变化规律,可为风电场机组布局提供参考。随着高度增加,地表摩擦和热力作用对气流的影响通常减弱,平均风速相应增大,紊动强度则趋于降低。因此,在风电场规划中,合理利用地形、主导风向和湍流强度分布特征,有助于减少机组之间的尾流干扰,提高风力发电系统整体效率和经济性。

这一认识对于高空风能开发同样具有启示意义。空中风力涡轮机或风筝发电系统通常需要在距地面数百米甚至数千米高度捕获较强且较稳定的风能资源。对湍流强度、风速廓线和边界层结构的科学计算,是判断优势风能高度、提高能量捕获效率和保障系统运行稳定性的关键。因此,湍流基础研究不仅可服务于传统风电场布局,也可为高空风能技术发展提供基础参数和理论支撑。

(6) 航空发动机流动计算中的应用

除自然风场和风电开发外,湍流基础研究还可用于旋转机械内部复杂流动的分析。例如,在航空发动机旋转光滑直通道湍流流动研究中发现,旋转效应会显著改变通道内湍流结构和流速分布。航空领域已有研究对经典对数公式中的卡门常数提出旋转修正方法,但由于问题十分复杂,修正后的计算曲线与实测数据之间仍存在较大差距。介永胜与张红武进一步比较表明,若改用式(9)进行计算,即使不进行旋转修正,其结果在不同当地旋转数 R_0 条件下比对数公式更接近实测数据;若采用航空界的方法对式(9)进行旋转修正,则与经典对数公式修正结果相比,计算精度明显提高(见图6)。

这一结果说明,式(9)在旋转湍流区的流速分布验证和预测中具有较好的适用性,并且能够与近壁层流区流速分布实现较为合理的衔接,从而为全流区流动结构的精细描述提供可能。由于航空发动机内部流动实验受到温度、雷诺数、旋转数和测试条件等限制,能够在更大参数范围内进行可靠计算,对于优化发动机设计、提高能效和降低能耗具有重要意义。

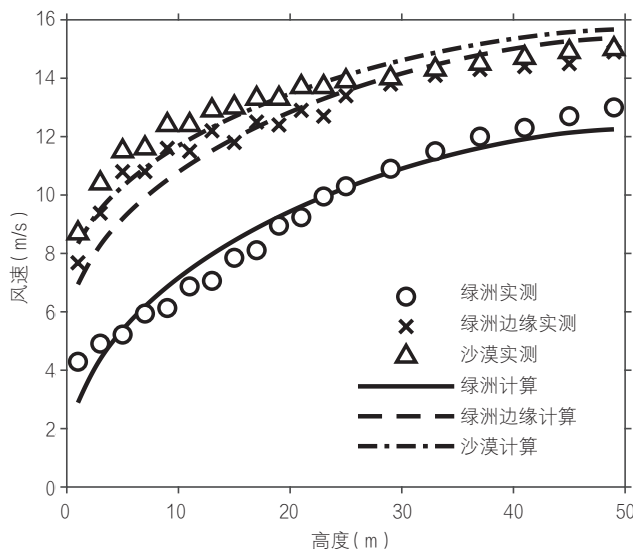


图5 不同下垫面条件下风沙事件中的风速分布实测值与计算结果

此外,这一应用也充分表明,只要找到前人运用对数流速公式或类似方法进行科学攻关的领域,就可以在降低能耗等方面取得研究突破。基础研究进展具有跨学科、跨领域的辐射价值,是推动多行业科学和技术创新的核心动力。正是这些探索与创新,为应对气候变化和降低能耗提供了科学支撑。

四、主要结论与建议

1. 主要结论

本文以“科学创新”与“降低能耗”为核心,从湍流基础理论的研究入手,系统阐述了湍流基础研究的突破对应用研究及工程技术进步所起到的引领作用,得到如下的主要结论:

湍流涡团模式及其建立的流速分布公式等基础研究进展,克服了经典对数流速分布公式水面流速最大但流速梯度不为0和在近壁处会出现函数奇点的理论缺陷,弥补了普朗特混合长经典模型的不足,为复杂水沙系统和相关领域湍流问题求解提供了新途径,且直接利用可体现相对粗糙度影响的流速公式和均匀流连续性方程,计算的水深与实测资料颇为接近,使从理论上计算黄河下游动床阻力成为现实。

基于上述湍流基础研究进展进一步建立的含沙量分布公式,首次以解析形式解决了Rouse公式含沙量在水面恒为0、在河底为负无穷大的不足;建立的纵垂向紊动强度垂线分布公式,迄今是较早经理论推导和最符合实测资料的公式;建立的弯道环流分布公式,首次给出同时适用于光滑和粗糙河床的解析式;建立的

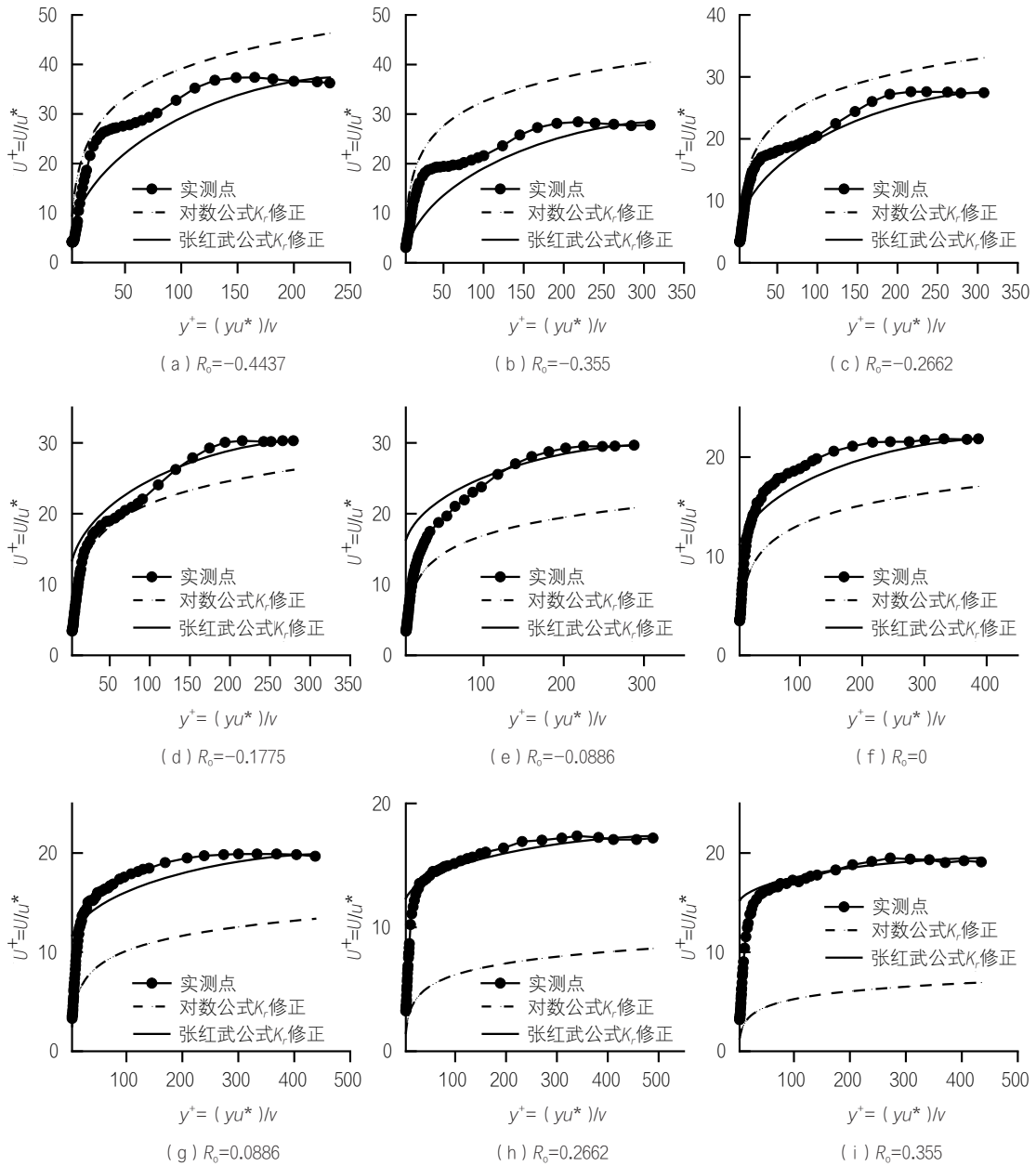


图6 张红武公式与经典对数公式均进行旋转修正后的比较

水流挟沙力公式不仅适用于一般挟沙水流，也适用于高含沙水流。湍流基础研究成果推动了黄河模型相似律的产生与完善，从理论上支撑了原型黄河资料分析，又使黄河水沙数学模型能够计算多沙乃至高含沙洪水。这说明湍流基础研究进展是应用研究的根本支撑，对水利学科发展具有推动作用。

本文所述湍流基础研究进展在水沙调控、工业管道输送、风沙治理、大气生态治理、风电开发、航空发动机流动计算等领域，都能应用且颇有优势。例如，用于航空发动机旋转光滑直通道湍流流动研究时，大

量实测资料验证表明，同样条件下张红武公式明显比经典对数公式更加符合实际变化规律，为高难度条件下的能效优化提供了新路径。这说明湍流基础研究进展对应用研究和工程技术研发创新具有积极的推动作用。

降低能耗是当前最具经济可行性的减排路径，应成为能源转型和生态治理协同推进的基本原则。在气候变化和资源约束加剧的背景下，单纯依赖能源替代难以满足减排目标需求，必须通过“能耗最小、效率优先”的系统性优化，实现生产、输送与消费全链条的能

效提升。为此,建议以基础研究为源头驱动系统级效率革命,不断深化湍流机理等关键基础研究,打通长期制约能效提升的“效率堵点”,挖掘尚未被高效利用的节能潜力,为能源转型、流域治理和应对气候变化持续提供科学支撑。

尽管湍流涡团模式及其相关进展在多个领域表现良好,但在强弯曲河道、急变河槽、局部跌坎、高含气掺气水流以及复杂旋转分离流动中,难免存在明显三维分离结构、强非均匀紊动和大尺度相干结构,使建立在二维流动基础上的涡团模式的理论适用性存在局限性,尚需在后续研究中进一步扩展和验证。在高雷诺数条件下,大尺度涡结构与小尺度耗散过程之间的能量传递更加复杂,部分公式中的经验系数表达可能随流动条件变化而发生偏移。因此,在超高雷诺数、强非平衡输沙以及剧烈床面变形条件下,现有方法的计算精度和稳定性仍需进一步检验。

2. 湍流基础研究支撑“双碳”目标实现的建议

实现“双碳”目标是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,基础研究作为绿色低碳技术原创突破、产业绿色转型和气候治理优化的根本依托,其水平直接决定“双碳”目标实现的质量与效率。现阶段我国基础研究支撑“双碳”目标仍存在科研布局不精准、核心科学课题难突破、产学研协同不足、资金人才配套薄弱、成果转化效率偏低等问题。立足发展实际,提出以下建议。

①强化顶层设计,明确水利领域基础研究战略方向。将低碳、零碳水利技术基础研究纳入相关规划核心范畴,重点将湍流基础理论、水工湍流能量转换机制、复杂水流调控技术等列入优先研究方向;制定水利行业中长期低碳支持计划,构建“政策-标准-技术-数据”协同体系,建立流域水资源碳核算体系与水工程能耗数据库,为水利行业实现“双碳”目标提供战略指引与数据支撑。

②加大资金投入,构建水利行业多元支持机制。设立水能高效利用、灌区节水改造、水生态修复及复杂水流控制与节能等关键领域基础研究专项基金,通过税收优惠、财政补贴激励水利企业研发创新;完善绿色金融体系,对水利绿色债券发行实施税收减免,建立水利绿色信贷、专项基金等融资渠道,降低基础研究项目成本,重点支持水利基础研究驱动的水电增效、灌区输水减损技术攻关。

③聚焦水利核心技术攻关,突破行业“双碳”技术

瓶颈。重点支持抽水蓄能、小水电增效、智慧灌区等水能优化技术,开展水轮机湍流流动优化、水库群联合调度湍流调控研究,通过“能耗最小、效率优先”的系统性优化,实现生产、输送与消费全链条的能效提升;推动灌区输水系统减阻,降低农业用水能耗;加强流域水生态修复中湍流-生态耦合机制研究,挖掘节能潜力,通过水流调控优化水生生物栖息环境;统筹水利工程碳汇提升与生态保护目标。

④完善水利市场机制与人才体系,驱动行业低碳转型。将水能、供水、排水等行业纳入碳市场试点,推动水利项目从能耗强度控制转向总量控制与有偿分配;落实水利工程碳排放“双控”制度,推广水工建筑物在线监测计量,强化碳定价机制与行业政策的衔接;同时深化国际合作,建立湍流基础研究与工程应用转化机制;加强水力学、碳计量、湍流控制等跨学科人才培养,组建“水利+湍流+低碳”多学科研究团队;建立技术风险评估与政策动态调整机制。

参考文献:

- [1] 张红武. 气候变化下能源转型路径与流域生态治理协同机制探讨[J]. 人民黄河, 2026, 48(2): 1-10.
- [2] 李国英. 治理黄河思辨与践行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 等. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 502-510.
- [4] 宋力格, 张红武, 张亚丽. 科学实验方法[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990.
- [5] 张红武. 河流泥沙科学研究的创新方法[J]. 中国水利, 2004(22): 19-21.
- [6] 夏震寰. 现代水力学(三) 紊流力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [7] 窦国仁. 紊流力学(下册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1987.
- [8] 张红武, 江思慧, 白咏梅, 等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
- [9] 张红武, 方红卫, 钟德钰, 等. 宁蒙黄河治理对策[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 1-25.
- [10] PRANDTL L. Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz[J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1925, 5(2): 136-139.
- [11] VON KÁRMÁN T. Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz[J]. Nachrichten von der Gesellschaft der

- Wissenschaften zu Göttingen (Math.-Phys.Klasse), 1930(1):58-76.
- [12] NIKURADSE J. Strömungsgesetze in rauhen Rohren[Z]. Beilage zu Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1933, B(4).
- [13] PRANDTL L. Zur turbulenten Strömung in Rohren und längs Platten[R]. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, IV, 1932:18-29.
- [14] VON KÁRMÁN T. Turbulence and Skin Friction[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1934, 1(1):1-20.
- [15] EINSTEIN H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows[M]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1950.
- [16] KEULEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels[M]. Gaithersburg: National Bureau of Standards, 1938.
- [17] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[M]// Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion. Oxford: Pergamon, 1983:96-116.
- [18] JONES W P, LAUNDER B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. International journal of heat and mass transfer, 1972, 15(2):301-314.
- [19] WILCOX D C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models[J]. AIAA journal, 1988, 26(11):1299-1310.
- [20] LAUNDER B E, REECE G J, RODI W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure[J]. Journal of fluid mechanics, 1975, 68(3):537-566.
- [21] GIBSON M M, LAUNDER B E. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 86(3):491-511.
- [22] SHARMA A S, MCKEON B J. On coherent structure in wall turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 728:196-238.
- [23] 梁再潮. 多相流与紊流相干结构[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1994.
- [24] MASON P J. Large-eddy simulation: A critical review of the technique[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(515):1-26.
- [25] VADROT A, YANG X I A, ABKAR M. Survey of machine-learning wall models for large-eddy simulation[J]. Physical Review Fluids, 2023, 8(6):064603.
- [26] MOIN P, MAHESH K. Direct numerical simulation: a tool in turbulence research[J]. Annual review of fluid mechanics, 1998, 30(1):539-578.
- [27] HUANG J, DUAN L, CHOUDHARI M M. Direct numerical simulation of hypersonic turbulent boundary layers: effect of spatial evolution and Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 937: A3.
- [28] VELA-MARTÍN A. The energy cascade as the origin of intense events in small-scale turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 937: A13.
- [29] ZAMPIRON A, CERINO B, BERNI C, et al. Very-large-scale motions in open-channel flow: Insights from velocity spectra, correlations, and structure functions[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4):041707.
- [30] 张红武. 弯道环流研究[R]. 黄河水利科学研究所, 1985.
- [31] 张红武. 河工模型变率及弯道环流研究[D]. 武汉:武汉水利电力学院, 1986.
- [32] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
- [33] 杨润祎, 张红武. 基于涡团模式的紊流流速与阻力系数的统一规律[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2026, 56:234711.
- [34] 杨润祎, 张红武. 工业输水管的紊流流速与阻力系数规律[R]. 清华大学黄河研究中心, 2025.
- [35] 惠遇甲, 李义天, 胡春宏, 等. 高含沙水流紊动结构和非均匀沙运动规律的研究[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [36] 李炜. 水力计算手册:第2版[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [37] 孙东坡. 环流流速分布的探讨[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 1988(1):26-30.
- [38] 郑邦民, 夏军强, 谈广鸣. 紊动扩散系数研究及其应用[M]//李义天. 河流模拟理论与实践. 武汉:武汉水利电力大学出版社, 1998:183-188.
- [39] 汪富泉, 丁晶, 曹叔尤, 等. 论悬移质含沙量沿垂线

- 的分布[J].水利学报,1998,29(11):44-49.
- [40] 张小峰,刘兴年.河流动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [41] 许念曾.河道水力学[M].北京:中国建材工业出版社,1994.
- [42] 张红武,马继业,张俊华,等.河流桥渡设计[M].北京:中国建材工业出版社,1993.
- [43] 罗诗琦.基于悬移质泥沙分布理论的泥沙扬动流速公式[J].人民黄河,2017,39(9):13-17.
- [44] 张红武,张清.黄河水流挟沙力的计算公式[J].人民黄河,1992,14(11):7-9+61.
- [45] 王明甫.高含沙水流及泥石流[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [46] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等.河流泥沙动力学[M].北京:水利电力出版社,1998.
- [47] 段红东,何华松,朱辰华.河流输沙力学[M].郑州:黄河水利出版社,2001.
- [48] 张淑英,郭同章,牛玉国.河流取水工程[M].郑州:河南科学技术出版社,1994.
- [49] 卢寿慈.粉体技术手册[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [50] 吴玲莉.河流动力学[M].北京:人民交通出版社,2019.
- [51] 韩其为.水库淤积[M].北京:科学出版社,2003.
- [52] 侯琳,张红武,赵君驰,等.水流挟沙力公式的理论剖析与检验[J].水利学报,2023,54(5):563-574+586.
- [53] 王彦博.不同河床粗糙度下水流挟沙规律研究[D].北京:清华大学,2026.
- [54] 张红武,张罗号,景唤,等.山东对黄河流域生态保护和高质量发展的作用不可替代[J].水利水电技术,2021,52(1):1-21.
- [55] 张红武,李琳琪,彭昊,等.基于流域高质量发展目标的黄河相关问题研究[J].水利水电技术,2021,52(12):60-68.
- [56] 李琳琪,张红武,傅旭东,等.黄河下游输沙需水量模拟预测研究[J].水利学报,2025,56(8):1037-1048.
- [57] HOU L, ZHANG HW, LI LQ, et al. A Method for Calculating Water Demand for Sediment Transport Based on the Principles of River Dynamics[J].Water, 2023, 15:3514.
- [58] 侯琳,张红武.黄河下游宽河段最优输沙断面参量研究[J].水利学报,2025,56(9):1178-1188.
- [59] 倪晋仁,王光谦,张红武.固液两相流基本理论及其应用[M].北京:科学出版社,1991.
- [60] 苏立志,龚西城,鲁详磊,等.基于高效输沙实现技术的淤筑村台示范研究[J].人民黄河,2021,43(3):39-46+96.
- [61] 张红武,李远发,张俊华,等.高浊度水管道混凝土试验研究[M]//邵维文.中国水利水电工程技术进展.北京:海洋出版社,1999:494-498.
- [62] 张红武.黄河“几字弯”地区风沙阻控原理及科学问题研究[J].人民黄河,2025,47(10):1-11.
- [63] 张红武.泥沙起动流速的统一公式[J].水利学报,2012,43(12):1387-1396.
- [64] 刘晓燕,杨胜天,王富贵,等.黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J].水利学报,2014,45(11):1293-1300.
- [65] 张红武,余午阳,师翠香,等.黄河“几字弯”地区风沙治理对策与阻控工程关键技术研发[J].人民黄河,2025,47(11):1-12+27.

责任编辑 吕彩霞