

河流沙丘的流体动力学研究综述

白文举 张浩宇

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：沙丘几乎存在于所有的河流中，在许多河流中预测水流阻力、泥沙输移和沉积是至关重要的。在过去的 15 年中，对冲积沙丘相关流体动力学的认识取得了重大进展。本文综述了冲积沙丘平均流和紊流的主要特征。重点讨论了以下 5 个可能的研究方向：①沙丘背风侧角度对沙丘尾流及下游流场流动过程的影响；②沙丘形状的三维性对湍流的产生和床面切应力分布的影响；③床面形态叠加和融合引起的流场变化；④沙丘湍流的尺度和拓扑结构及其与输沙和流面的相互作用；⑤悬浮泥沙对沙丘流场和沙丘形态的影响，以期对河流治理提供借鉴。

关键词：河流；沙丘；力学；综述

DOI：10.69979/3060-8767.24.3.017

引言

在现代河流的实际管理中，河流沙丘在环境和工程科学的许多分支中具有重要的地位^[1-3]。随着人类对水土资源需求的增加，越来越需要以有效和可持续的方式管理许多规模的河流，因此对河流的流量、输沙量以及河床和河岸稳定性的预测对工程师、地貌学家和规划者来说至关重要^[4-5]。本综述论文旨在实现两个目标：①简要综述与河流沙丘有关的水流、形态和泥沙输运的主要特征；②利用这一综述强调最近/正在进行和未来研究的五个领域，这些研究似乎对形成对河流沙丘流体动力学更完整的理解至关重要。

1 概况

过河沙丘的水流具有不对称的横断面形态，具有休止角的背风面，在稳定、均匀的单向流中产生，可概括为五个主要区域：①沙丘背风侧形成流动分离区，沙峰下游约 4 ~ 6 个沙丘高度发生再附。沙脊下游 4 ~ 6 级沙丘高度。②在分离区边界产生一个剪切层，它将这种循环流动从上面的自由流流体中分离出来；大尺度湍流以 Kelvin - Helmholtz 不稳定的形式沿此剪切层产生，随着自由剪切的扩展，它产生了一个尾迹区，该尾迹区向下游发展并耗散。③第三个区域是沙丘背风侧的扩展流区。④在再附区的下游，随着流动的重新建立，一个新的内边界层开始生长，并发展出一个更对数的速度剖面。⑤最大水平流速出现在沙丘顶部，此处的床面切应力可能足以产生上面级的平面床面条件：此处流动的确切性质将决定沙丘背风侧沉积物供给的速率和周期，从而决

定背风侧沉积物分选的性质。

这种在不对称沙丘上产生的水流结构对水流阻力、床面切应力和输沙有许多重要的影响。例如，与沙丘形态相关的流动分离和流动加速/减速产生的压差，在沙丘上产生一种净作用力，即“形态阻力”。此外，沙丘输沙量的预测是沙丘研究许多应用的一个重要方面，依赖于能够估计沙丘上的剪切应力，并将其与输沙方程联系起来。因此，在这种复杂流动中剪切应力的参数化需要对平均流场进行评估，以考虑沙丘形态、床面形态叠加和背风坡角度的影响，并评估空间平均对剪切应力估计的影响。

然而，越来越多的研究表明，沙丘上的紊流场对于确定瞬时床面切应力、局部推移质输沙率和泥沙悬浮至关重要。

2 五个关键领域

2.1 低角度沙丘的发生与流体动力学

过去的许多模拟和研究都集中在具有休止角背风面的河流沙丘的动力学上，这些沙丘在下游产生流动分离和明显的湍流。

许多大型河流似乎越来越有可能以背风坡低于休止角的沙丘为特征。背风坡坡度在 2 ~ 8 之间，背风坡坡度随着洪水过程线流量的增大而增大。Johns 等^[6]报道了非对称沙丘背风侧不存在永久性流动分离的现象。由于已知与沙丘覆盖层相关的流动阻力和能量消耗与沙丘背风侧的流动分离的发展和程度密切相关，因此量化沙丘的形态并评估其在影响流场中的作用变得非常重要。低角度沙丘的沉积在沉积记录中也

可能是重要的,低角度沙丘在其保存的前积物中具有更低的倾角,可能叠加了向下迁移的更小的沙丘。此外,这些沙丘的低角度和不同形状,与休止角沙丘相比,可能使保存的前积大小与古水流深度重建之间的关系比目前假设较陡的背风坡模型预测的问题更多。

在低角度沙丘上可能存在流动分离,但野外测量,可能是水槽测量,不能足够接近床面,以揭示永久分离的流动区域。然而,实验和数值模拟都表明流动分离确实会发生,但它是流动的一种瞬态特征。

2.2 沙丘三维空间的影响

除了过去大多数关于沙丘流体动力学的研究涉及休止角沙丘外,几乎所有的工作都处理了基本是二维的形态,没有三维形状或曲率,这种情况在天然河道中很少见。Allen^[7]的开创性工作很好地解释了从一系列床面形状平面形状下游流动分离和边界层恢复的复杂性质。从一系列床面流出,形成平面形状。与二维情况相比,床面形态的三维性给流动带来了相当大的复杂性,产生了流向和展向的涡量以及复杂的流动的辐合和辐散。尽管从过去的工作中可以看出水流的三维性,但在所有的天然河道中,量化三维沙丘形态及其对水流结构的影响的问题直到最近才得到解决。Maddux 等^[8]提出了详细研究流动在固定三维沙丘的沙丘是二维水槽宽度,但峰线的高度不同,从而引入三维形式最小和最大在峰线高度和节点之间。这项工作表明,最大流向速度最高的节点而不是最大波峰线高度,湍流在这些 3d 沙丘低于 2d 同行,蜿蜒的波峰线与二次级流的存在负责很大比例的动量通量在沙丘。

2.3 床面形态有叠加、融合和沙丘的稳定性

天然河道的床面形态记录表明,不同尺度的沙丘频繁出现,可能是对不均匀和非恒定流的响应,洪水过程线内的滞后效应,或大沙丘迎水侧发展的内边界层。较小的沙丘叠压在较大沙丘的凸起一侧,部分低角度的背风侧也有叠压的沙丘。多波束测深现在也可以完全量化这种叠加的性质,既显示了叠加沙丘在较大沙丘迎风面的波长变化,又显示了这些较小沙床形态的三维平面形态。不同尺度沙丘的叠加也将对大沙丘顶部沉积物的周期性补给起到至关重要的作用,从而决定了背风侧雪崩和错开形成的时间波动。因此,沙丘-侧流沉积的确切性质可以精确地记录其侧壁迁移的叠置床面形态,进一步利用沙丘叠置的这一属性来完善我们对古床面形态动力学的重建具有很大的潜力。床面迁移的速度主要取决于床面的大小和需要搬运的沉积物的体积,较小的床面具有较高

的迁移速度。

2.4 与沙丘相关的湍流的尺度和拓扑以及与流动表面的相互作用

在天然河道中,一个常见的现象是沙丘相关的湍流在流动表面上的爆发,从而产生大规模的上升流和沸腾。实验室和实地调研也阐述了这些涡旋与沙丘之间的联系,但对这些相干流结构的拓扑结构以及它们如何接近和与流面相互作用知之甚少^[9]。Babakaiff 和 Hickin^[10]阐明了这种与沙丘有关的大尺度湍流在泥沙输运中的作用。认为上升流的大小和强度与沙丘高度和相对形态粗糙度有关,并强调形成明显的冲刷坑会增加湍流的产生。他们总结了几项研究的数据,表明在较低的相对粗糙度下,沸腾周期最长,当相对粗糙度超过 0.2 (即沙丘高度 > 0.2 水流深度) 时,沸腾周期变得恒定,这表明在较高的相对粗糙度下,沸腾更频繁。大尺度湍流是许多河流沙丘的流动特征,并且这种湍流的表面表现在沙丘相对粗糙度较高和波峰线曲率较大时明显较强。

Best^[9]总结了这些信息和对沙丘覆盖层上方水面的观测,提出了一个与沙丘相关的湍流与流动表面相互作用的示意模型。该模型指出了涡旋圈与地表相互作用的阶段,以及这如何表现为随着沸腾在地表演化和喷发而产生的不同的上升流运动。该模式展示了初始的横向涡度如何伴随着垂直涡度,随着沸腾的发展,涡环的涡腿附着在表面,这种模式在许多自然河流中是常见的。更为重要的是,Best 还认为,这种上升流和流面的相互作用必须引起随后的向床面的下沉,以满足流动的连续性,并认为旋转涡和随后的高速流体向床面的涌入之间的相互作用在泥沙输运中至关重要。

2.5 悬移质泥沙对沙丘形态及水流动力学的影响

在固定床和流动床上的沙丘实验室研究以及野外调查中,大多数都研究了水流清澈或悬浮泥沙浓度较低的情况。然而,该领域的研究表明,泥沙悬浮与低角度沙丘的产生之间可能存在联系以及从沙丘到上层平面沙层的过渡也与悬浮床沉积物的增加效应有关。来自天然河道的数据表明,随着悬移质与推移质比例的增加,沙丘形态变得更低、更平坦。然而,在一些自然通道中,沙丘的高度和陡度在较高的运输阶段也会增加,表明悬沙浓度可能不是影响床面形态扁平化的唯一变量。此外,室内试验表明,在一定的黏土浓度下,沙丘形态可能会发生显著的改变,在较高的体积黏粒浓度下,沙丘越来越被上层平面沙床所取代。

3 结论

河流沙丘是河流景观中普遍存在的特征,在许多纯研究和应用研究领域具有重要意义,包括当代和古代的沉积环境。本文概述了一些正在进行的研究和争论的领域,并强调了综合的、最重要的跨学科研究的必要性,以更全面地了解沙丘形态和流动的形态和运动学。在未来的研究中,会出现两个广泛的主题。首先,迫切需要了解床面形态三维性与相关流场之间的复杂关系,以及三维性在调节水流和泥沙输运中的作用。这必须包括对脊线曲率、沙丘形态和床面形态叠置的调查。显然,最近在现场方法、实验室实验和数值模拟方面的发展为研究这些复杂流场提供了一个强有力的集成方法。其次,过去许多关于沙丘流动力学研究都利用了清水条件和固定床,这使得人们对平均和湍流流动结构有了很大的了解。然而,未来的工作必须解决真正移动床的复杂性,以及在低含沙量和高含沙量下水流、泥沙输运和发展床面形态之间的各种联系。这对于发展能够更好地应用于当代冲积水道的经验关系和理论模型至关重要。

参考文献

- [1]李慧. 世界大型河流沙丘背水面几何形态研究[J]. 水利水电快报, 2020, 41 (04): 5.
- [2]刘宇慧. 内蒙古东部响水河沿岸河流—沙丘相互作用研究[D]. 湖南师范大学, 2017.
- [3]蒋宏伟. 沙丘前沿区河流的特性分析 [J]. 东北水利水电, 2013, 31 (04): 32-33.
- [4]蒋宏伟. 沙丘前沿区河流的特性分析 [J]. 水土保持科技情报, 2005, (01): 31-33.
- [5]张春生,张吉来,朱广社,等. 河流沙丘形成过程的基本特征 [J]. 江汉石油学院学报, 2003, (03): 5-7+4.
- [6]Johns, B., R. L. Soulsby, J. Xing. A comparison of numerical model experiments of free surface flow over topography with flume and field observations[J]. J. Hydraul. Res., 1993, 31, 215-228.
- [7]Allen, J. R. L. Current Ripples: Their Relation to Patterns of Water and Sediment Motion [M]. New York, 1968.
- [8]Maddux, T. B., J. M. Nelson, S. R. McLean. Turbulent flow over three-dimensional dunes: 1. Free surface and flow response[J]. J. Geophys. Res., 2003, 108(F1), 6009.
- [9]Best, J. L., P. J. Ashworth, C. S. Bristow, J. E. Roden. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh[J]. J. Sediment. Res., 2003, 73, 516-530.
- [10]Babakaiff, C. S., and E. J. Hickin. Coherent flow structures in Squamish River Estuary, British Columbia, Canada, in Coherent Flow Structures in Open Channels[M]. Hoboken, 1996.

作者简介: 白文举, 1970.08.10, 本科学历, 高级工程师, 一直从事水利工程建设管理, 履历: 企业总工程师, 总经理、党委书记、董事长等职务。