

保持河道远距离输沙的断面形态研究

郭真 田鹏

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：冲积河道的形态是沉积物运输和沉积的结果。河道的形态主要由输送的沉积物的大小和数量决定，同时尽管受河道尺度的影响。然而，泥沙输运与河流形态之间的关系却受到关注较少。本文基于 Shields 数的泥沙运动模式来研究这个问题，Shields 数是一个给定尺度的河道泥沙运动能力的无量纲量。该问题还从反角度进行了探讨，利用泥沙沉积的数量和特征来推断泥沙沿渠道输移和沉积变化的细节。这两种方法的耦合为获得对冲积水道形态成因的新见解奠定了基础。

关键词：冲积沉积；河道几何形态；河床形态；河流地貌；泥沙输移

DOI: 10.69979/3029-2727.24.05.022

引言

冲洪积河道是在其搬运和沉积的沉积物中形成的。相应地，通道是自成体系的。河道的几何形态是泥沙运动过程的直接结果，然而这种本质上的联系在现有的研究中却很少得到重视。本文的目的是探讨河流输沙与河道形态之间的关系。运输中的碎屑沉积物通常根据其搬运机制进行分类，河流中的主要类别为悬浮和推移质。悬浮泥沙在水柱中被向上运动的紊动水流所支撑。这样的物质在沉积之前可能会走很长的路。推移质（牵引运输）通过翻滚、滑动或弹跳越过河底进行，其重量主要由床面支撑。这样的材料容易在一次运动中只走很短的距离。跃移是第三类运动，它在水中的重要性远不如在风沙输运中，但在实际中很难与间歇悬浮分离。

1 河流泥沙

河床泥沙与河流泥沙常混为一谈，特别是中砂和粗砂，一般认为它们是床沙，但是两者会在强水流中运动成悬浮物的床料。这也许是运输和冲积物形态之间的联系没有得到足够重视的一个原因，现有的泥沙运动资料并不能方便地用于河流沉积分析。尽管如此，人们一直试图了解泥沙输运与冲积河道形态之间的关系。长期以来，人们认识到悬浮运动的细颗粒泥沙与低坡度蜿蜒河流之间的普遍联系，以及牵引运动的粗颗粒泥沙与相对高坡度的低蜿蜒河流之间的对比关系^[1-6]。

泥沙运动可以定性表述为： $Q_s \sim Q_s$ ， D 表示冲积河流河道的均衡或分级条件，其中 Q 为流量， S 为河道比降， Q_s 为输沙通量， D 为输沙粒径。该关系式表明，对于给

定的水流能量，就有多少特定粒径的泥沙可以运输。流量主要决定河道的规模，比降决定能量的消耗率，而对于给定的比降，冲积形态的性质主要由输送到河道中泥沙的粒径和数量决定。控制条件的平衡也决定了河道的稳定性。形态和稳定性在图 1 中得到了表示，该图解将河道形态与沉积控制条件联系起来。

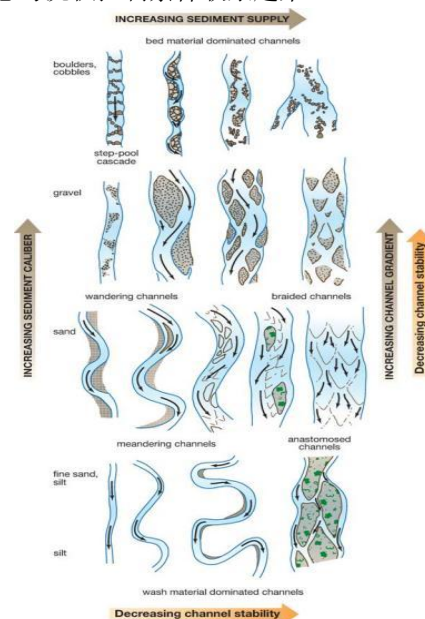


图 1 冲积河流河道形态与主要控制因素的关系图

2 泥沙运动模式

将 Lane 关系式改写为 $Q_s \sim Q_b d/d$ ，其中 Q_b 为推移质， d 为水深，关系式中水流和泥沙的相对尺度有效地控制了水流能力。通过重新排列和插入适当的常数

$$Q_b / Q = f[\rho g d S / g(\rho_s - \rho) D] \quad (1)$$

其中 g 为重力加速度， ρ_s 和 ρ 分别为泥沙和水的

密度，即 Shields 函数。括号中的项通常用 τ^* 表示，称为 Shields 数。它是流动施加的剪切应力的无量纲表达式，尺度与颗粒尺寸有关。左边的项是推移质泥沙在输移中的平均浓度，方程 1 是泥沙输移函数。

Dade 和 Friend^[7]探讨了不同等级泥沙在输移过程中 τ^* 的特征行为，得到了水流沉降速度与剪切速度之比、推移质所占份额之间的特征关系。该比值随相对深度变化， $\zeta = d / z_b$ ，其中 d 为流动深度， z_b 为推移质层厚度。对于砾石，由于 $z_b \approx D$ ， ζ 近似为相对粗糙度的倒数。他们定义了悬移质输移的界限和推移质输移的界限。悬浮控制被认为发生在推移质占比小于 10 % 的情况下。

可以将 Shields 数重新排列并替换常数：

$$S = 1.65 \tau^* D / d \quad (2)$$

图 2 说明了这种函数关系与特征泥沙运动状态的关系。显然，坡度、尺度和沉积物性质决定了特定河流的输移机制，正如控制条件所预测的那样，除规模外的所有因子都可以通过河流进行调整。从这种关系也可以推断，随着坡度和相对糙率的减小，输沙机制必须通过一个正常的流域而系统地改变。

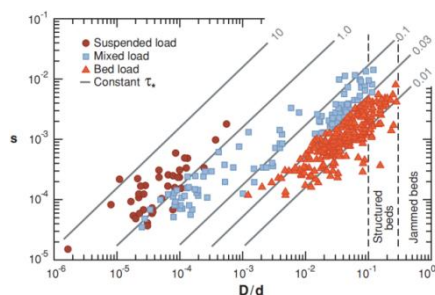


图 2 河道比降 (S) 与相对糙率 (D / d) 的关系

综上所述，可以对河道进行定义。其中第一类河道，泥沙运输被限制在阈值 ($0.01 \leq \tau^* \leq 0.1$) 附近的条件，出现在砾石和较粗的物质中。第二类，河流主要由悬浮的泥沙组成，该类由于泥沙的不稳定，床面容易被泥沙运输过程持续变形，出现在砂和较细的沉积物中。在这两个明显不同的类别之间，有一组过渡性河道，通常出现在细砾石或砂砾石中，或在低坡度的砂床河道中，其中发生了充分的泥沙流动性。

通过上述 3 种运输机制 Shields 数的取值范围可以更精细地划分渠道制度类型。主导的输沙模式控制着泥沙淤积的性质，从而控制着河道形态的主要特征。推移质必然沉积为河道内的堆积物，水流必须绕过堆积物流动，从而形成相对较宽的浅水河道区和兼具起动型和过

渡型河道特征的侧向失稳形式。因此，不稳定的水道相对较深、较窄，具有较高的坝尺度地形。

3 泥沙输移与河道形态测量方法

第一类河道的特征是单个砾石或较粗的碎屑在相对较低的过剩剪切力下的运动。冲刷不深，沉积物堆积不叠压，个体碎屑位移主导了河道的变化。在较大的河道中，可以在航拍图像上识别变化，从而可以从航拍图像中编制地形图。必须编制地图的频率将取决于河流的活动性和沉积趋势的持久性。辫状河道具有不稳定性，使得通过直接测量来获得泥沙输移的估计变得异常困难。

在不稳定的河道中，河床物质的沉积收支一般不能用航测方法来研究。与沙质床面相联系的补偿冲刷和填充是此类渠道输沙的一个常规特征。我们回顾了可能将沙丘传播与床沙物质输运估计联系起来的方法，但在河道周边细颗粒泥沙比例较高的河流中，大部分床沙物质以悬浮状态运动。尽管如此，基于泥沙收支的方法仍然是可行的，只要在河段限制和支流交汇处可以获得泥沙运输的记录。悬浮泥沙的直接测量比推移质的测量更常规，因此这可能是一种可行的策略。Andrews^[8]利用输沙量构建河段泥沙收支平衡的一次有意义的尝试，他研究了调控引起显著淤积后格林河系对泥沙的配置。

然而，测站的位置将计算单元限制在相当长的河段上。长期的部分泥沙收支可能是建立在足够平均沙丘移动影响的曲流迁移的基础上的。在这种情况下，尽管床面物质的总输移可能不会，但形态上显著的泥沙输移可以被记录下来。

4 结论

冲积河流的河道形态是河流输沙和淤积的结果，且很大程度上取决于河床泥沙的运移。这种物质可能在推移前进，也可能在沙粒范围内悬浮移动。因此，泥沙输移与河流形态之间的联系没有得到应有的分析。本文根据水流的 Shields 数来研究泥沙输移机制，起动型、过渡型和不稳定输沙模式分别与 Schumm 的推移质、混合型和悬移质输沙模式相似^[9]，但在输沙率、细颗粒输沙量和重要性的基础上又有新的变化，从而影响到河岸形态和河流整体形态的演变机制。

参考文献

- [1] Fernández G E ,D í az C M ,Wei Y , et al. M

odeling sediment movement in the shallow-water framework: A morpho-hydrodynamic approach with numerical simulations and experimental validation [J]. Ocean Modelling, 2024, 192 102445-102445.

[2]Li W ,Zhang Y ,Hu P , et al. Evolutions of hydrodynamics and sediment transport pattern in the Qiantang Estuary (China) in response to multidecadal embankment constructions [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2024, 309 108965.

[3]Yuan P ,Zhang Z ,Li Y , et al. Experimental study on hydrodynamic performance of mobile training structure mooring system and numerical study on the influence of submerged state on sediment transport [J]. Ocean Engineering, 2024, 312 (P2): 119071.

[4]冯梅,王刚,张甲波,等. 渗流输沙过程的颗粒运动状态和影响因素分析[J]. 水力发电,2024,50(03):44-

53+74.

[5]沈淇,顾峰峰,万远扬,等. 基于泥沙随机交换过程及不同推移形式的推移质输沙公式[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(03):599-610.

[6]沈颖,刘洁,杨胜发. 粗颗粒泥沙起动概率研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(04):1-10.

[7]Dade WB, Friend PF. Grain-size, sediment transport regime, and channel slope in alluvial rivers[J]. J. Geol., 1998, 106: 661-675.

[8]Andrews ED. Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado and Utah. Geol[J]. Soc. Am. Bull., 1986, 97: 1012-1023.

[9]Schumm SA. Patterns of alluvial rivers[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 1985, 13:5-27.

作者简介: 郭真, 1975.08, 本科, 一直从事水利工程建设管理, 履历: 任总经理、副董事长等职务.