

河床形态对水沙条件的响应研究

白文举 郭真

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：本文通过相关研究进展，分析了河流侵蚀、泥沙输送和积累之间的相互关系及其在现代河道过程研究中的进一步发展。侵蚀和积累之间的时空联系考虑了不同尺度上的河道过程——河流纵剖面、河道形态模式、冲积层形式（条形、沙丘）和单个沉积物颗粒。建立了河流地貌活动、输输送能力和泥沙预算之间的关系（泥沙输入和输出；河道床侵蚀和泥沙夹带及其沉积）。河道平面、被后者分隔的漫滩段和冲积河道河床是不同时空尺度下泥沙输运过程的地貌表达式。

关键词：河道过程；沉积物；侵蚀和堆积；纵断面；河道床形态

DOI：10.69979/3029-2727.24.05.024

引言

河道形成过程为河流与河流物质的相互作用，河流物质在河流演变过程中不断组成新的河床和河岸。河流物质即河流泥沙的运动影响着河流的冲淤过程，河流的冲淤又会导致河流形态发生改变^[1-3]。河流形态的改变可能诱发一定的河流灾害，如洪水和河岸坍塌等。因而对水沙条件与河流的冲淤规律分析具有重要的理论和实际意义^[4-6]。本文通过阅读相关研究成果，从河流的沉积和侵蚀两方面来分析河床的冲淤演变机制，以对河流治理提供一定的理论参考。

1 河流的侵蚀和沉积过程^[2-5]

由于河道过程被理解为水流和泥沙流量的相互作用，导致河道形态在纵向和横向上的改变，因此侵蚀和沉积是河道变形的形式。河道变形、侵蚀和沉积之间的关系可以用一个泥沙通量参与的方程进行表示。该方程通过考虑沉积物通量和冲积沉积物体积参数的变化以及河道过程的形态表达和局部侵蚀和沉积比率的变化，如式（1）所示：

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (1)$$

其中， W_2 和 W_1 分别代表通过下游（输出）和上游（输入）边界的泥沙通量， ΔW 是沉积预算的结果值。显然，泥沙输入和输出之间有三种可能的比率：

$W_2 > W_1$ 、 $W_2 < W_1$ 和 $W_2 = W_1$ 。这就导致了三个可能的结果值： $\Delta W > 0$ 、 $\Delta W < 0$ 和 $\Delta W = 0$ 。后者显示了沉积通量变化的总体趋势，但没有描述其在所考虑的河流内可能发生的变化或均匀性的合理性。对于没有斜坡或额

外泥沙供应的河段，结果值仅与冲积泥沙的变化有关，

$\Delta \Delta W$ ：

$$\Delta W = -\Delta W_0 \quad (2)$$

从方程（2）中可知，相应的变量等于绝对值，但有相反的符号。下游沉积通量的增加表明冲积沉积储量的减少。反之亦然，下游泥沙通量的减少会导致在所考虑的范围泥沙储存量的增加。通过河流河段的恒定泥沙通量显示了河道（ W_{ch} ）、高低洪水（ W_{hf} 和 W_{lf} ）和阶地（ W_{ter} ）中冲积泥沙体积的稳定性。这些储存的体积等于不同范围内储存的冲积泥沙的总体积：

$$W_0 = (W_{ch} + W_{hf} + W_{lf} + W_{ter}) \quad (3)$$

河道河床沉积物储存体积的变化表明了河道的垂直变形，而泛滥平原和梯田面积的变化则表明了河道的横向变形。

泥沙收支方程的结果值可以表明不同过程对冲积泥沙通量变化的影响。外部（关于考虑的河道河段）过程决定了通过上游边界以及当地流域区域输入河道的体积（ W_1 ）和模式。内部过程通过改变当地泥沙储存量 W_0 ，将值 W_1 修改为 W_2 。所有这些过程的总体影响可以用一个详细的泥沙收支方程来描述， ΔW 不等于 0。

$$\Delta W = \sum_{i=1}^P W_i - \sum_{j=1}^S W_j \quad (4)$$

其中， W_i 和 W_j 为第 i 个外部过程和第 j 个内部过程占沉积物总预算的沉积物量。由于物质守恒定律，方程（4）正式化了影响河流系统沉积流量的各种过程。

公式（4）的第二个项取决于选定的河段的位置，以及河流类型。包括土壤侵蚀和质量运动在内的山坡沉积过程。河源头的通常特征是下游流量参数相对快速的增

加,包括沉积通量。因此, $\Delta W > 0$ 的分布通常出现在河流系统的上部,这意味着冲积泥沙的体积减少 ($\Delta W < 0$),甚至基岩侵蚀消失。在河流系统的中部地区,谷底的宽度往往会显著增加。因此,河流沉积物的流量变化主要由河流侵蚀和以横向和垂直河道变形为代表的沉积在谷底所控制。

河段内的侵蚀主要意味着 $\Delta W < 0$,而主要沉积以 $\Delta W > 0$ 条件表示。侵蚀和沉积之间的平衡只有在考虑到足够长的时间周期 T 时才有可能实现,这取决于特定的河流系统特征。在下游河流中,由于其他因素的累积作用不显著,河流的侵蚀和沉积起着绝对的优势作用。河流下游河段的河流泥沙通量变化的主要特征是其下游流量的减少,其中 $\Delta W < 0$ 和 $\Delta W > 0$ 。同时,在所有冲积系统的横截面方向上都可以观察到大量的失衡,这与个别河道平面或大河床(边池)尺度上的局部河道变形有关。

2 河道纵向剖面的演变^[3-7]

在地质和历史时间尺度上,河道纵向剖面的形成反映了侵蚀和积累相互作用的复杂性。河流侵蚀和沉积的内在机制决定了平衡纵剖面形成的一般趋势,最好的描述是泥沙流量 W 与流体输送能力 W_{tr} 相等的条件:

$$W_i = W_{tr} \quad (5)$$

其中, i 为河道河床纵剖面的任意点的指数。替换(5)两侧的相应方程 ($V = C \times (hI)^{1/2}$ 表示流速,其中梯度 I 表征通道床高程的下游变化),得到特定水力条件下平衡长曲线方程。在准平衡条件下的河道的自然纵剖面可以有不同的形状,但条件(5)在其中的每一点上都是正确的。如果不满足这一条件,则通过改变通道梯度,改变流动输送能力来对非平衡进行补偿。即,当 $W_i > W_{tr}$ 引起通道梯度和流量输送能力增加时,沉积发生消失,而当 $W_i < W_{tr}$ 导致通道梯度和流量输送能力降低时,则发生侵蚀。因此,河道发育过程中河流侵蚀沉积的相互作用指向与特定流量的河道平衡纵断面形状对应的条件的一致性。很明显,对于不同的流量,与平衡剖面的形成相对应的通道变形的幅度可以有很大的变化。因此,引入了以下特殊函数定量评估河流水文对准平衡曲线波动的总影响:

$$\Delta z = f\left(\frac{Q_j P_j}{b_j}\right) \quad (6)$$

这与流量的定量表征的表达式相似:

$$Q_{cf} = \max[f(\sigma Q^m IP)] \quad (7)$$

这两个方程具有相同的物理意义,说明给定的流量 Q 重复频率 P 越高,其对形成准平衡纵向轮廓(对于特定河段)和河道演变(其中 σ 和 m 系数, b 河河道宽度)的贡献越高。

假设河流流量水文图对河道纵向剖面演变的累积影响可以总结为(并且相当于)单一 Q_{cf} 值的影响,则可以确定与 Q_{cf} 条件(5)对应的所谓“平衡”通道床梯度:

$$I_0 = \frac{k_i R_{b_i}^m}{Q_{cf_i}^n} \quad (8)$$

其中为 R_{mbi} 床载泥沙产量; Q_{ncfi} 为河道形成的流量;经验系数 k 、 m 和 p 描述了给定河段的条件。实际(观察到的)通道床梯度 I 通常不等于 I_0 。 i 的自然或人为降低或增加导致“平衡”通道床梯度值的降低。在这种情况下,可以通过下游进展的降解能力来恢复泥沙通量和流量输送能力之间的平衡。

3 河床变化的侵蚀和沉积^[1-5]

河床的演变也是河流侵蚀和沉积过程种的结果。沉积物颗粒在河道床沉积物表层连续侵蚀,从沙丘侧侵蚀,并在沙丘的背侧重新沉积。这些持续的侵蚀-沉积的结果影响是床形在纵向上的迁移。冲积河道的起伏带可形成不同大小的复杂地层。根据水文状况阶段、流量和速度,形成这一层次的河床在一定程度上受到上述更高构造水平(尺度)的河流侵蚀和沉积过程的影响。流量的增加迫使一定大小的河床迁移较慢或被侵蚀,而另一种尺寸的河床可以同时增加迁移速率,因为它们的长度接近于给定的水文和水力条件下的沉积物颗粒旋转的距离。

通道床形态的长期变形与单个床形态的迁移有关,其尺寸与通道宽度相当。这种类似尺寸的变形的强度取决于通道的稳定性。

$$C_r = k \frac{Q_{cf}}{II} \quad (9)$$

河道河床表面的任何部分都具有相同的规律性,其侵蚀和沉积过程可以看作是单个沉积物颗粒的动员、阻力、倾斜、悬浮和沉降。这些过程的一般特征是由流速、泥沙的临界非侵蚀速度、速度的最大脉动成分和沉积物颗粒的水力大小之间的平衡决定的。动员和悬浮的优势表明在基本表面段内的侵蚀和通道床切口,而主要的颗

粒沉降表明床退化。

4 结论

河流侵蚀与沉积的密切联系和相互作用是河道治理过程的一般和基本特征。它深刻地影响了河谷中不同时间的冲积物之间交换的强度和方向。它也为不同尺度的、从河床到河谷的河流地貌的形成和演变过程提供了解释。后者可以被认为是在不同空间尺度（或河道过程的结构水平）上侵蚀和沉积相互作用的形态表达：单个沉积物颗粒的动员、运输和沉积；单个河道平面和床形的演化和迁移；以单一河道模式为特征的形态均匀的河道段的形成；河流纵断面动力学。在自然河道中，与不同时空尺度相关的河道侵蚀和沉积过程同时叠加，导致河道、漫滩和河谷整体演化的极其复杂。有些过程只在地质时间尺度上明显，而另一些则可以直接观察。

参考文献

- [1] 陈科科. 不同边界条件下河流形态变化规律分析[J]. 珠江水运, 2024, (07): 7-9. DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2024.07.003.
- [2] 白玉川, 孙艳杰, 宋晓龙, 等. 尾闾河道形态演变特

征的模拟试验研究[J]. 水科学进展, 2024, 35(03): 508-520.

[3] LIS, DUFFY CJ. 河流浅水流动、泥沙输移和河床演变的全耦合建模方法[J]. 水利信息化, 2023, (02): 93-94.

[4] 刘柏君, 贺丽媛, 李红艳. 干旱区河流径流演变及成因分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(09): 40-43.

[5] 王长金, 胡鹏, 李薇, 等. 河流分汊成因与演变机制研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(03): 112-120.

[6] 李志威, 鲁瀚友, 陈帮, 等. 辫状河流演变过程与机理的研究进展[J]. 水科学进展, 2021, 32(06): 957-968.

[7] ALEKSEEVSKIY N, BERKOVICH K, CHALOV R. Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(2): 93-105.

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.