

防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量*

刘 凌 董增川 崔广柏

(河海大学水资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

提 要 水土流失问题是生态系统面临的重要问题. 对于多沙河道来说, 必须维持一定的生态环境需水量用于输沙, 以保证河道生态平衡. 本文以多沙河流为研究对象, 以输沙动力学理论为基础, 分析了河流输沙能力和水流挟沙能力, 在此基础上提出了河道在不冲不淤的临界状态下河流最小流量的计算方法, 此为防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量. 通过实际算例, 本文还说明了所提出的计算方法的应用, 以期多沙河道水资源合理配置及生态平衡维护提供科学依据.

关键词 最小生态环境需水量 多沙河流 淤积

分类号 X143 P343.1

水土流失问题是生态系统面临的重要问题, 我国是世界上水土流失最严重的国家之一, 由于水土流失, 我国平均每年约有三分之一的泥沙淤积在平原河道、湖泊和水库中, 或被引入灌区以及分洪区内. 对于河流系统来说, 经常遇到的情况是水少沙多, 如果大量泥沙进入下游后不能全部输送入海, 其结果将造成河床淤积, 水位抬升, 降低了河道的排洪能力, 并成为下游河道堤防决口、河流改道、洪水泛滥、生物多样性受损的重要根源进而甚至影响海岸带的生态平衡. 因此, 从保护河流系统生态环境、维护生态平衡的角度, 对于多沙河道, 必须维持一部分环境需水量用于输沙, 以达到保持河道冲淤平衡的目的.

河流系统最小生态环境需水量是指维持其正常的生态和环境功能所必须的最小水量, 由于其影响因素多、体系复杂, 并且与人类社会活动密切相关, 所以至今还缺乏统一的标准与定量模式. 关于此问题的研究目前已成为环境水利界的热点和难点. 在相关研究中, 董增川等^[1]从我国西部地区水资源合理配置的宏观角度, 提出了三种不同的水资源量—生产需水量、生活需水量和生态环境需水量的确定方法, 提出了西部地区生态环境需水量所涵盖的五方面内容; 刘凌等^[2]从内陆河流生态环境需水量定量研究的角度, 提出了内陆河流所必须维持的三个方面的生态环境需水量的计算方法, 即分别为: 维持河流系统水生生物生存、维持水体一定量稀释自净能力和满足水面蒸发损失需要的生态环境需水量; 王西琴等从维持河道水体一定量稀释自净能力的角度, 计算了河道最小环境需水量^[3,4]. 但是, 对多沙河流来说, 其生态环境需水量还必须包括一个重要的内容, 即: 防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量, 此部分需水量是多沙河流冲淤保河、维护生态平衡不可缺少的组成

*高等学校博士学科点基金项目(2000029407)资助.

2002-12-15 收稿; 2003-05-06 收修改稿. 刘凌, 女, 1964 年生, 博士, 教授.

部分, 而目前关于此方面的定量计算方法尚未见. 本文的研究, 将针对多沙河道, 利用输沙动力学理论, 探索防止河道泥沙淤积的最小环境需水量的定量计算方法, 以期为水资源合理配置、为维护生态平衡提供科学依据.

1 研究方法

1.1 水流挟沙能力分析

水流挟沙能力是指具有一定水力因素的单位水体所能挟带的悬移质泥沙数量. 通常, 悬移质按照其来源不同, 又可分为床沙质和冲泻质两部分, 其中, 床沙质系悬移质中较粗的部分, 在河床组成中大量存在; 而冲泻质系其中较细的部分, 在河床组成中很少存在. 水流所挟带的悬移质泥沙, 其补给来源通常有两方面: 一是来自上游的流域侵蚀及干支水系的河床冲刷; 另一是来自本河段的河床河岸冲刷. 通常床沙质部分, 由于可以从本河段床沙中得到充分补给, 应处于饱和状态, 与河段水力要素之间应存在一定的函数关系; 而冲泻质部分, 因不能从本河段床沙中得到充分补给, 应处于次饱和状态, 其含量多少与上游补给条件有关, 而不决定于本河段的水力要素. 因为在一般情况下, 水流所挟带的冲泻质常处于不饱和状态, 而只有床沙质能处于饱和状态, 因此, 水流挟沙能力通常是指水流所挟带的悬移质中床沙质的能力.

当水流作为一度流处理时, 水流挟沙力系一全断面的平均值, 可用方程 (1) 表示如下:

$$S_* = \frac{G_{S_*}}{Q} \quad (1)$$

式中, S_* 表示水流挟沙能力 (kg/m^3), 即处于饱和状态的临界含沙量, G_{S_*} 为悬移质中床沙质的全断面饱和输沙率 (kg/s), Q 为河流流量 (m^3/s). 悬移质中属于床沙质部分的数量, 是由水流条件和床沙组成条件决定的, 如果超过了一定的数量, 就会发生淤积, 低于一定的数量, 就会发生冲刷, 只有刚好等于某个数量, 才能保持不冲不淤的相对平衡状态. 所以方程 (1) 表达的是在不冲不淤的临界状态下, 悬移质中属于床沙质部分的数量.

为确定方程 (1) 中床沙质的全断面饱和输沙率 G_{S_*} , 可首先测定断面悬移质输沙率 Q_S ; 然后再利用拐点法^[5]从实测床沙质断面平均颗粒级配曲线上确定悬移质中床沙质与冲泻质的分界粒径, 再从实测悬移质断面平均颗粒级配曲线上求出床沙质的含量百分比 x , 进而求得 G_{S_*} , 即如方程 (5) 所示.

$$G_{S_*} = Q_S \cdot x / 100 \quad (2)$$

式中, Q_S 为全断面悬移质平均输沙率 (kg/s), x 为悬移质中床沙质的含量百分比(%).

方程 (1) 中水流挟沙能力的大小, 主要与上游来水来沙条件和河道下垫面条件有关, 具体包括: 河道流量、含沙量、水深、河宽、断面形态、泥沙沉降速度、泥沙在水中的有效重率、水的重率、重力加速度、泥沙粒径和河流粘滞性系数. 张瑞瑾等^[5]从挟沙水流的能量平衡原理出发, 认为悬移质具有制紊作用, 浑水在单位时间内的能量损失将比同条件下清水的能量损失为小, 其差值应与水流悬浮泥沙所消耗的紊动能有关, 据此导出公式的结构形式之后, 通过整理长江、黄河及若干水库、渠道和室内水槽的大量资料, 发现: 代表水流挟沙力的悬移质中属于床沙质部分的临界含沙量 S_* 与代表水流条件和床沙组成条件的综合因素 U^3/gRw 有较好的关系, 此处, U 为断面平均流速 (m/s), R 为水力半径 (m),

对于宽浅河道可用平均水深 h 代替, w 为床沙质的平均沉速 (m/s), g 为重力加速度 (m^2/s), U^3/gRw 为无因次量. 通过拟合相关关系, 得出水流挟沙力动力学公式如下:

$$S_* = K \cdot \left(\frac{U^3}{gRw}\right)^m \tag{3}$$

式中, K 为包含量纲的系数, 其单位为 kg/m^3 , m 为指数, K 和 m 不是常数, 而是随着无因次变量 U^3/gRw 改变的.

方程 (3) 的建立, 是以广泛的实测资料为基础的.

1.2 防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量

因为方程 (1) 中计算的河道流量 Q 代表的是不冲不淤临界状态下的河道流量, 流量若大于此值则可能冲刷河床质, 流量若小于此值则可能淤积泥沙, 因此, 方程 (1) 中的河道流量 Q 也就是防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量. 将方程 (1)、(2) 和 (3) 结合, 即可得到防止河道泥沙淤积的最小生态环境需水量的计算公式如下:

$$Q = \frac{G_{S_*}}{S_*} = \frac{Q_S \cdot x/100}{K \cdot \left(\frac{U^3}{gRw}\right)^m} \tag{4}$$

2 防止河流泥沙淤积所需维持的最小生态环境需水量的计算实例

通过实例, 来具体说明防止河流泥沙淤积所需维持的最小生态环境需水量的计算方法. 以黄河为例, 以黄河下游利津站在平水年 1986 年的实测资料来计算和说明.

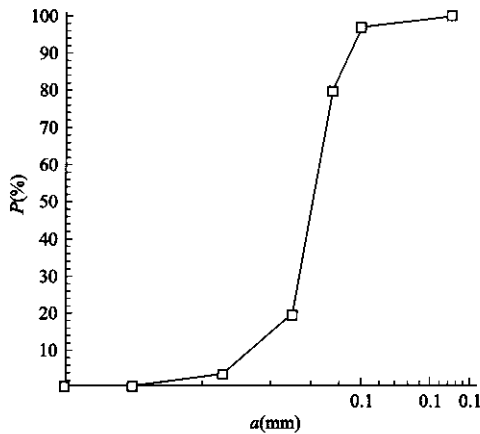


图 1 黄河利津站实测河床质断面平均颗粒级配曲线

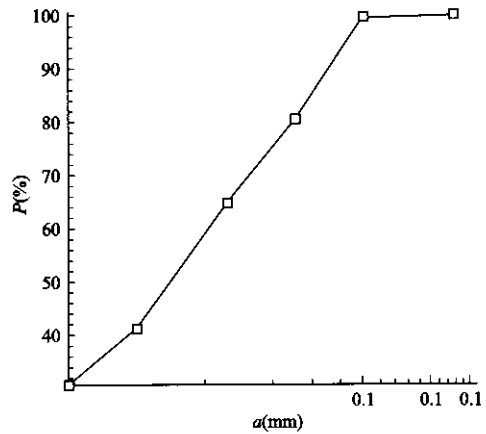


图 2 黄河利津站实测悬移质断面平均颗粒级配曲线

Fig.1 The section average granulometric curve for bed load at Lijin station of Huang River

Fig.2 The section average granulometric curve for the suspended load at Lijin station of Huang River

1986 年 4 月 24 日黄河利津站实测床沙质断面平均颗粒级配曲线和实测悬移质断面平均颗粒级配曲线如如图 1 和图 2 所示, 图中, 横坐标 a 表示颗粒粒径, 纵坐标 P 表示小于某颗粒的沙重百分数, 由图 1 可见, 其床沙粒配曲线下脚拐点处所对应的颗粒粒径为: $0.023mm$, 此为冲泻质及床沙质的分界粒径, 从图 2 中可求出小于 $0.023mm$ 粒径的沙重百分

, 此为冲泻质及床沙质的分界粒径, 从图 2 中可求出小于 0.023mm 粒径的沙重百分数为 63.5%. 因此, 悬移质中床沙质的含量 x 为 36.5%. 水温 25.4°C. 在悬移质粒配曲线中床沙质包含四个粒径组, 0.023-0.025mm 的粒径级 A 占 1.3%, 0.025-0.05mm 的粒径级 B 占 15.7%, 0.05-0.1mm 的粒径级 C 占 19.0%, 0.1-0.25mm 的粒径级 D 占 0.5%.

计算泥沙颗粒的沉速 w :

粒径小于 0.1mm, 采用 Stocks 公式, 即:

$$w = \frac{gD^2}{18\nu} \left(\frac{g_s - g}{g} \right) \quad (5)$$

粒径在 0.15-1.5mm 之间, 采用下列公式:

$$w = 6.77 \frac{g_s - g}{g} D + \frac{g_s - g}{1.92g} \left(\frac{T}{26} - 1 \right) \quad (6)$$

上式中, ν 为水的运动粘滞系数, g 为重力加速度, g_s 和 g 为沙粒与液体的容重, T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$), D 为沙粒的直径 (mm).

由此可以计算出粒径 0.023mm 的颗粒沉降速度为 0.053cm/s, 粒径 0.025mm 的颗粒沉降速度为 0.063cm/s, 粒径 0.05mm 的颗粒沉降速度为 0.25cm/s, 粒径 0.1mm 的颗粒沉降速度为 1.0cm/s, 粒径 0.25mm 的颗粒沉降速度为 2.4cm/s.

再计算床沙质四个粒径级的几何平均沉速分别为:

$$w_A = 0.058\text{cm/s}; w_B = 0.146\text{cm/s}; w_C = 0.583\text{cm/s}; w_D = 1.65\text{cm/s}$$

因此, 四个粒径级的综合平均沉速为:

$$w = \frac{1.3 \times 0.058 + 15.7 \times 0.146 + 19.0 \times 0.583 + 0.5 \times 1.65}{1.3 + 15.7 + 19.0 + 0.5} = 0.391\text{cm/s}$$

因为方程 (3) 中的 K 和 m 将随着 $\frac{U^3}{ghm}$ 的变化而变化, 所以对于任何河流, 必须尽可能的利用实测资料检验方程 (3) 的适用性, 并确定 K 和 m 值.

根据黄河下游实测资料, 做回归曲线, 其结果如图 3 所示. 图中, 纵坐标为对数坐标, 代表含沙量, 即表示水流挟沙能力 S_* , 横坐标也是对数坐标, 代表无因次变量 $\frac{U^3}{gRm}$, 图中实线表示回归曲线, 由图 3 可见, 各实测数据点均在回归曲线附近, 相关系数达到 0.985, 这表示回归结果基本可靠, 可用于定量分析之中. 回归曲线的形式为线性直线, 表达式为:

$$\lg S_* = -0.66 + 0.858 \lg \left(\frac{U^3}{gRm} \right) \quad (7)$$

因为回归方程 (7) 与方程 (3) 一致, 这说明此段河流可用方程 (3) 描述水流挟沙能力与无因次变量的关系, 由此得出相关参数值 ($k = 0.224, m = 0.912$) 和计算方程如下:

$$S_* = 0.219 \cdot \left(\frac{U^3}{gRw} \right)^{0.858} \quad (8)$$

在黄河利津站 1986 年的实测资料中，从 1 月至 12 月，在每一月中找出与本月平均流量最接近的典型天，再以典型天各项参数的实测值作为该月各项参数的代表值进行计算，得结果如表 1 所示。

因此，为防止黄河下游泥沙淤积，平均需要维持的河道最小生态环境需水量 Q 为：

$$Q = 583.6 \text{ m}^3/\text{s} = 184.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$$

即：必须保持利津站年平均入海水量为 $184.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，这样就可基本做到冲淤平衡，防止黄河下游河道淤积，维持生态平衡。

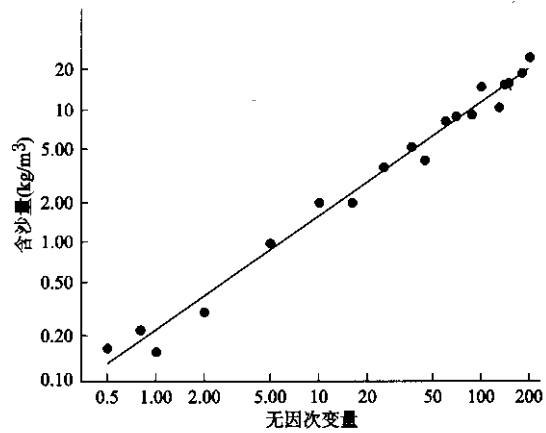


图 3 水流挟沙能力实测数据回归曲线
Fig.3 Regression curve for the sand carrying capacity measurements

表 1 黄河利津站防止河道淤积的最小生态环境需水量计算表

Tab.1 Calculation results for the lowest ecological water demand in Lijin station of Huang River

月份	月平均流量 (m^3/s)	典型天实	典型天实测参数				S_s (kg/s)	Q (m^3/s)
		际流量 (m^3/s)	流速 U (m/s)	水深 h (m)	日平均悬 移质输沙 率 (kg/s)			
1	632	666	0.51	2.66	841	0.2746	1118.1	
2	659	685	0.7	2.67	1340	0.6183	848.4	
3	402	233	0.54	1.18	260	0.6388	159.3	
4	291	300	0.66	1.2	621	1.0555	230.3	
5	93.6	100	0.51	0.73	112	0.8326	52.66	
6	66.9	129	0.72	0.96	99	1.5991	24.24	
7	1440	1510	1.6	2.06	45900	6.4862	2770.5	
8	945	981	1.37	1.69	10600	5.1556	804.9	
9	687	703	1.54	1.68	10100	7.0024	564.7	
10	202	248	0.58	1.05	336	0.8487	155.0	
11	296	321	0.75	2.13	324	0.8965	141.5	
12	270	287	0.78	2.01	357	1.0423	134.1	
年平均	498.7	513.6	0.855	1.67	5908	2.2042	583.6	

3 结论

以多沙河流为研究对象，以输沙动力学理论为基础，从防止河流泥沙淤积、维护河流生态平衡的角度，本文提出了多沙河流在不冲不淤的临界状态下最小生态环境需水量的定量计算方法，并通过实际算例进行了说明。本文研究将为多沙河流水资源合理配置及生态平衡的维护提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 董增川, 刘 凌. 西部地区水资源配置. 水利水电技术, 2001, 32 (3): 1-4
- 2 刘 凌, 董增川, 崔广柏. 内陆河流生态环境需水量定量研究. 湖泊科学, 2002, 14 (1): 25-31
- 3 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(I)—理论. 环境科学学报, 2001, 21 (5): 544-547
- 4 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(II)—应用. 环境科学学报, 2001, 21 (5): 548-552
- 5 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 220-224
- 6 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学(上册). 北京: 水利出版社, 1981: 110-187

The Lowest Ecological Water Demand to Prevent the River Sediment Accumulation

LIU Ling, DONG Zengchuan & CUI Guangbai

(Water Resources Development and Utilization Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract

Erosion loss is one of the most important problems in the ecological system. For the heavily silt loaded river, it is necessary to allocate a certain amount of ecological water demand for the maintenance of the ecological system balance. Taking the heavily-silt loaded river as the research object and based on the sediment transport kinetic theory, the river sediment discharge and sand carrying capacity were analyzed in this paper. Therefore, the calculation method for the critical river flow rate in the no scouring and no sanding status was proposed in this paper. This method is exactly the calculation method for the lowest ecological water demand to prevent the river sediment accumulation. Using an actual example, the application of the proposed calculation method was carried out and illustrated. It is noteworthy that this study will be beneficial for water resources proper allocation and ecological balance maintenance.

Keywords: Lowest ecological water demand; the heavily silt-loaded river; sediment accumulation