永定河下游河道输沙需水量研究

严 军 田世民 孙东坡 柴洪敏

(华北水利水电学院 郑州 450008)

摘 要 本文根据输沙需水量概念和计算方法计算了永定河下游河道的输沙需水量。通过对永定河下游河道输沙需水量的分析,提出了输沙用水调控原则,为多沙河流输沙需水量的计算和输沙用水调控,提供了有益的借鉴。

关键词 输沙需水量 输沙流量 单位输沙需水量 输沙用水调控

1 研究意义

河道输沙需水量是从中国河流特殊的生态系统考虑而提出的概念。鉴于中国北方的一些多沙河流普遍存在河道径流减少、断流现象增多和洪水威胁加剧的趋势,维持河道水沙平衡的重要性显得日益突出。河流输沙功能的衰竭将导致河道淤积的加剧和河流系统功能的丧失,为保障河流输沙功能的基本要求,必须充分利用有限且相对不足的水资源。因此,河道输沙需水量研究具有重要的理论与现实意义。

2 输沙需水量的研究现状

2.1 输沙需水量概念

以往对输沙需水量的研究中,特定输沙情况下的净水量(径流量除去泥沙体积所剩的净水体积)往往被称为输沙需水量^[1~5],但是实际情况下,净水量并不总是全部用来输沙的,只有在平衡状态或淤积情况下,净水量才全部用于输沙。因此,可将输沙需水量定义为:在一定水沙条件和河床边界条件下,将一定量泥沙输移至下一河段所需要的水量。它特指净水量中用于泥沙输移的水量,视水沙条件和输沙效率的不同,输沙需水量是净水量的部分或全部^[6]。

2.2 输沙需水量的计算方法

以往研究中,计算输沙需水量的方法有含沙量法、输沙总水量法以及资料分析法,但它们计算的实际上是单位净水量^[1~5]。根据本文所采用的输沙需水量的概念,输沙需水量可以由下式计算^[6]:

$$W' = \eta W_w \quad (1)$$

$$W_w = W - W_s/\gamma_s \quad (2)$$

式中: W' 为输沙需水量, m^3 ; η 为输沙效率; α 为系数 (其值由输沙效率 η 确定^[6]); W_w 为净水量, m^3 ; W 为径流量, m^3 ; W_s 为输沙量, 亿 t; γ_s 为泥沙容重 (通常取 $2.65\text{t}/\text{m}^3$)。

通过考察河段进口站和出口站的输沙量或含沙量可以确定其冲淤情况, 进而确定输沙效率 η 及系数 α 。

$$q' = W'/W_s \quad (3)$$

式中: q' 为单位输沙需水量, m^3/t ; W' 为输沙需水量, m^3 ; W_s 为输沙量, t。

3 永定河下游河道输沙需水量研究

永定河是海河北系中最大的一条河流, 下游河道因泥沙淤积, 已形成地上河且迁徙不定。近年来随流域内人口与工农业的发展, 流域内缺水问题更为严重。为此, 本文以永定河为例, 研究河道输沙需水量的具体特性。

3.1 河道概况

永定河上游流经黄土高原, 河水含沙量大, 因此有“小黄河”、“浑河”之称, 下游河道因迁徙不定, 旧称“无定河”。永定河多年平均年径流量 20.29 亿 m^3 , 最大为 36.30 亿 m^3 (1956 年), 最小为 11.19 亿 m^3 (1972 年), 最大与最小年径流量的比值为 3.24, 是海河水系中山区年径流年际变化最小的河系。选择永定河 6 个主要水文站——响水堡、石匣里、官厅、雁翅、三家店和卢沟桥, 利用这 6 个水文站的资料进行计算和分析。

3.2 永定河下游河道水沙特性

根据 1948~1989 年永定河下游河道 6 个主要水文站的逐日水沙资料 (流量、含沙量等), 计算各站每日的径流量和输沙量, 将每年分为汛期 (7~10 月)、非汛期 (1~6 月和 11~12 月) 和全年 (1~12 月), 计算各水文站汛期、非汛期和全年的径流量、输沙量、平均流量和平均含沙量并分析其变化规律。具体处理时, 考虑官厅水库的影响, 将响水堡与石匣里站径流量或输沙量作为一个变量考虑。

对各水文站实测资料的分析表明, 各水文站的径流量、平均流量从 1956 年起明显地呈现逐年递减的趋势。以官厅水库为例, 1956 年以前官厅汛期径流量多大于 8.84 亿 m^3 , 1956 年以后官厅水库出库径流量多小于 5 亿 m^3 (特别是 1980 年以后多小于 2.4 亿 m^3); 非汛期出库径流量自 1962 年以后多小于 8 亿 m^3 , 1980 年以后多小于 4 亿 m^3 ; 1970 年以后全年出库径流量多小于 10 亿 m^3 , 1980 年以后多小于 6 亿 m^3 。1956 年以前官厅汛期流量多大于 $82\text{m}^3/\text{s}$, 1956 年以后多小于 $50\text{m}^3/\text{s}$ (特别是 1980 年以后多小于 $22\text{m}^3/\text{s}$); 非汛期出库流量自 1962 年以后多小于 $43\text{m}^3/\text{s}$, 1980 年以后多小于 $20\text{m}^3/\text{s}$; 1970 年以后全年出库流量多小于 $40\text{m}^3/\text{s}$, 1980 年以后多小于 $20\text{m}^3/\text{s}$ 。

各站汛期输沙量和平均含沙量都明显大于非汛期, 汛期是输沙的主要时期。仍以官厅水库为例, 1956 年以前, 官厅站汛期平均含沙量一般大于 $43\text{kg}/\text{m}^3$ 、非汛期平均含沙量一般大于 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、年平均含沙量一般大于 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 。1956 年以后, 上游来沙大部分淤

积于库区,官厅站各时期平均含沙量均大幅度减小,汛期入库平均含沙量多为 10~25 kg/m³,出库含沙量一般小于 2kg/m³,非汛期入库平均含沙量多为 2~7kg/m³、出库含沙量均小于 0.039kg/m³,年平均入库含沙量多为 5~15kg/m³,出库含沙量均小于 3kg/m³。尽管出库沙量大幅度减小,但由于下游地区过度用水使下游各站水量沿程衰减甚至断流,也可能造成下游河道淤积,使得下游河道输沙条件进一步恶化。

自然条件变化及人类活动影响,导致永定河下游各水文站径流量出现这种变化,且从根本上影响下游河道的输沙规律。官厅水库的修建,使永定河下游河道的水沙特性发生了非常明显的变化。为此,将 1948~1989 年分为 1948~1956 年和 1957~1989 年两个时段,分析永定河下游河道的水沙特性。表 1 为 1948~1956 年、1957~1989 年和 1948~1989 年官厅汛期、非汛期和全年进、出库径流量、沙量、平均流量和平均含沙量。

表 1 官厅不同时期进、出库水沙要素统计表

时 期	1948~1989 年				1948~1956 年				1957~1989 年				
	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	
入 库	汛 期	5.07	17.65	47.68	34.84	7.12	43.16	67.03	60.59	4.57	11.47	42.99	25.10
	非汛期	5.46	4.02	26.13	7.36	6.77	8.76	32.40	12.92	5.15	2.88	24.61	5.59
	全 年	10.53	21.68	33.39	20.58	13.90	51.92	44.07	37.36	9.71	14.34	30.81	14.76
出 库	汛 期	4.57	10.65	43.00	23.30	9.03	45.06	84.99	49.89	3.59	0.61	33.81	1.70
	非汛期	6.78	1.67	32.43	2.47	8.16	7.39	39.01	9.06	6.48	0.01	30.99	0.01
	全 年	11.35	12.32	35.99	10.86	17.19	52.45	54.51	30.51	10.07	0.62	31.94	0.61

由表 1 可知,与 1948~1956 年相比,1957~1989 年官厅汛期、非汛期和全年入库和出库流量均有所减小。水流条件的减弱使得对应时期入库含沙量大幅度减小,且减小的幅度超过 50%,出库流量过程的“坦化”也降低了大流量过程的水流强度,对下游河道输沙极为不利。水流条件的减弱,不仅使 1957~1989 年官厅入库含沙量较 1948~1956 年大幅度减小,而且使 1957~1989 年官厅出库含沙量减小的幅度更大(同一时期出库含沙量不足入库含沙量的 7%)。

3.3 永定河下游河道冲淤特性

1948~1989 年官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期出库平均流量的增大而减小,其非汛期点群较为分散、全年次之,汛期点群较为集中。官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期出库平均流量之间的关系可分别用下式表达:

$$\Delta W_s/W_s = -61.587 \ln Q + 248.14 \quad (4)$$

$$\Delta W_s/W_s = -178.82 \ln Q + 602.62 \quad (5)$$

$$\Delta W_s/W_s = -68.273 \ln Q + 253.79 \quad (6)$$

式中: $\Delta W_s/W_s$ 为官厅—卢沟桥河段淤积比,%; Q 为官厅出库平均流量, m³/s。

根据式 (4)~(6),可计算官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡(淤

积比为 0、10% 或 20%) 时官厅水库对应时期的出库流量 (官厅临界出库流量), 计算结果如表 2 所示。由表 2 可见:

官厅一卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅水库汛期临界出库流量分别为 $56.21\text{m}^3/\text{s}$ 、 $47.79\text{m}^3/\text{s}$ 和 $40.62\text{m}^3/\text{s}$, 非汛期临界出库流量分别为 $29.08\text{m}^3/\text{s}$ 、 $27.50\text{m}^3/\text{s}$ 和 $26.00\text{m}^3/\text{s}$, 全年临界出库流量分别为 $41.15\text{m}^3/\text{s}$ 、 $35.55\text{m}^3/\text{s}$ 和 $30.70\text{m}^3/\text{s}$ 。因非汛期出库沙量远小于汛期, 官厅非汛期临界出库流量也远小于汛期。汛期、非汛期和全年的临界出库流量均随官厅一卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

表 2 官厅一卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界出库流量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界出库流量 (m^3/s)		
	W (10^6m^3)	W_s (10^6t)	Q (m^3/s)	S (kg/m^3)	淤积比为 0	淤积比为 10%	淤积比为 20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	56.21	47.79	40.62
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	29.08	27.50	26.00
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	41.15	35.55	30.70

官厅一卢沟桥河段淤积比为 0 时, 官厅水库汛期和全年临界出库流量均大于对应时期多年平均出库流量、非汛期临界出库流量小于多年平均出库流量; 官厅一卢沟桥河段淤积比为 10% 时, 官厅水库汛期出库流量大于汛期多年平均出库流量、非汛期和全年临界出库流量小于对应时期多年平均出库流量; 官厅一卢沟桥河段淤积比为 20% 时, 官厅水库汛期、非汛期和全年出库流量均小于对应时期多年平均出库流量。

3.4 永定河下游河道输沙需水量特性

3.4.1 输沙需水量分析

与输沙需水量的定义类似, 流量中用于输沙的那部分称为输沙流量。1948~1989 年官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期出库输沙流量的增大而减小, 其非汛期点群较为分散、全年次之, 汛期点群较为集中。

官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期出库输沙流量之间的关系可分别用下式表达:

$$\Delta W_s/W_s = -19.862\text{Ln}Q' + 34.409 \quad (7)$$

$$\Delta W_s/W_s = -167.06\text{Ln}Q' + 484.37 \quad (8)$$

$$\Delta W_s/W_s = -21.295\text{Ln}Q' + 70.501 \quad (9)$$

式中: $\Delta W_s/W_s$ 为官厅一卢沟桥河段淤积比, %; Q' 为官厅出库输沙流量, m^3/s 。

根据式 (7) ~ 式 (9), 可计算官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡 (淤积比为 0、10% 或 20%) 时官厅水库对应时期的出库输沙流量 (即官厅临界输沙流量), 计算结果如表 3 所示。由表 3 可见:

(1) 官厅一卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为 $34.31\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20.80\text{m}^3/\text{s}$ 和 $12.57\text{m}^3/\text{s}$, 非汛期临界出库输沙流量分别为 $18.16\text{m}^3/\text{s}$ 、 $17.11\text{m}^3/\text{s}$ 和 $16.11\text{m}^3/\text{s}$, 全年临界出库输沙流量分别为 $27.40\text{m}^3/\text{s}$ 、 $17.13\text{m}^3/\text{s}$ 和 $10.71\text{m}^3/\text{s}$ 。汛期、非汛期和全年的临界出库输沙流量均随官厅一卢沟桥河

段淤积比的增大而减小。

(2) 官厅—卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅水库汛期临界出库输沙流量均小于相同条件下多年平均出库流量, 也小于相同条件下出库临界流量。这表明实际流量确实并非全部用于泥沙输移。

比较相同条件下 (同一时期、同一淤积比) 官厅出库临界流量和临界输沙流量, 发现:

(1) 相同条件下官厅出库临界流量均小于出库临界流量, 这表明即使在冲淤平衡条件下, 临界流量也并非全部用于泥沙输移。

(2) 官厅—卢沟桥河段淤积比与官厅出库流量的关系较为分散, 与此相比, 官厅—卢沟桥河段淤积比与官厅出库输沙流量相关关系大为增强, 这一方面表明实际流量并非全部用于泥沙输移, 另一方面表明输沙流量比实际流量更能揭示泥沙输移的实质。

表 3 官厅—卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界出库输沙流量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界出库输沙流量 (m ³ /s)		
	W (10 ⁶ m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	淤积比为 0	淤积比为 10%	淤积比为 20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	34.41	20.80	12.57
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	18.16	17.11	16.11
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	27.40	17.13	10.71

3.4.2 单位输沙需水量分析

根据输沙需水量与单位输沙需水量的关系, 由式 (3) 计算 1948~1989 年官厅 (出库)、雁翅、三家店和卢沟桥汛期、非汛期和全年的单位输沙需水量。可以发现, 1948~1989 年官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期单位输沙需水量的增大而减小, 其非汛期点群较为分散, 全年次之, 汛期点群较为集中。

官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期单位输沙需水量之间的关系可分别用下式表达:

$$\Delta W_s/W_s = -1.2831 \text{Ln}q' + 64.731 \quad (10)$$

$$\Delta W_s/W_s = -55.592 \text{Ln}q' + 230.78 \quad (11)$$

$$\Delta W_s/W_s = -0.9068 \text{Ln}q' + 52.281 \quad (12)$$

式中: $\Delta W_s/W_s$ 为官厅—卢沟桥河段淤积比, %; q' 为官厅单位输沙需水量, m³/t。

根据式 (10) ~ 式 (12), 可计算官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡 (淤积比为 0、10% 或 20%) 时官厅对应时期的单位输沙需水量 (即官厅临界单位输沙流量), 计算结果如表 4 所示。由表 4 可见:

(1) 官厅—卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅汛期临界单位输沙需水量分别为 50.43m³/t、63.52m³/t 和 57.65m³/t, 非汛期临界单位输沙需水量分别为 42.64m³/t、53.06m³/t 和 46.63m³/t, 全年临界单位输沙需水量分别为 34.85m³/t、44.33m³/t 和 35.60m³/t。汛期、非汛期和全年的临界单位输沙需水量均随官厅—卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

(2) 官厅—卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 同一淤积比时官厅临界单位输沙

需水量均非汛期最大，全年次之，汛期最小。这表明输沙效率以汛期最高，全年次之，非汛期最低。

表 4 官厅—卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界单位输沙需水量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界单位输沙需水量 (m ³ /t)		
	W (10 ⁶ m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	淤积比为 0	淤积比为 10%	淤积比为 20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	50.43	42.64	34.85
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	63.52	53.06	44.33
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	57.65	46.63	35.60

根据输沙需水量、输沙流量和单位输沙需水量的定义，输沙流量与单位输沙需水量之间的关系可用下式表达：

$$Q' = W'/t = \frac{W_s q'}{t} \quad (13)$$

式中： Q' 为输沙流量，m³/s， W' 为输沙需水量，m³； t 为时间，s； W_s 为输沙量，t， q' 为单位输沙需水量，m³/t。

由式(13)可知：在输沙量一定的情况下，输沙流量与单位输沙需水量成正比；单位输沙需水量一定时，输沙流量与输沙量成正比；输沙流量一定的情况下，输沙量与单位输沙需水量成反比。

4 输沙用水调控原则

根据对永定河下游河道输沙需水量和单位输沙需水量的计算和分析，可采用以下输沙用水调控原则。

4.1 优先选用临界单位输沙需水量

在输沙量一定的情况下，输沙流量与单位输沙需水量成正比，而同一输沙量下，较大的单位输沙需水量往往意味着较低的输沙效率，因此，欲达到较高的输沙效率必须选择较小的单位输沙需水量，但单位输沙需水量较小时，输沙需水量也较小。由淤积比与输沙需水量的关系可知，输沙需水量越小，河道越易于淤积、淤积比越大。所以，在输沙量一定的情况下，欲达到较高的输沙效率并使河道淤积比较小，可以选择河道处于冲淤平衡时的临界单位输沙需水量。因具体河道的输沙效率一般以汛期最高，全年次之，非汛期最低，故可选择汛期冲淤平衡时的临界单位输沙需水量。

4.2 辅助措施

在高效输沙的具体过程中，还应注意以下几点：

(1) 避免流量过程的“坦化”，应在水流强度较大的情况下集中输沙。

(2) 即使是按冲淤平衡的水沙条件调控官厅出库水沙组合，也应保证下游河道维持相对稳定的流量，以免因流量沿程衰减导致河道淤积。

(3) 使流量过程维持足够的时间, 确保下游河道输沙顺畅。

5 结论

输沙需水量指在一定水沙条件和河床边界条件下, 将一定量泥沙输移至下一河段所需要的水量。官厅—卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为 $34.31\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20.80\text{m}^3/\text{s}$ 和 $12.57\text{m}^3/\text{s}$, 汛期、非汛期和全年的临界出库输沙流量均随官厅—卢沟桥河段淤积比的增大而减小。可优先选用临界单位输沙需水量并采用适当的辅助措施, 对水沙需水量进行调控。

参 考 文 献

- 1 钱意颖, 叶青超, 曾庆华. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993
- 2 岳德军, 侯素珍等. 黄河下游输沙需水量研究. 人民黄河, 1996
- 3 赵华侠, 陈建国等. 黄河下游洪水期输沙用水量与河道泥沙冲淤分析. 泥沙研究, 1997 (3): 57-61
- 4 费祥俊. 高含沙水流长距离输沙机理与应用. 泥沙研究, 1998 (3): 55-61
- 5 石伟, 王光谦. 黄河下游输沙需水量研究评述. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究与进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001
- 6 严军, 胡春宏. 黄河下游河道输沙需水量的计算方法及应用研究. 泥沙研究, 2004 (4)