

【水资源】

永定河下游河道生态需水量

严 军¹, 苗 卉², 柴洪敏¹, 张晓亮³, 张晓松⁴

(1. 华北水利水电学院 水利系, 河南 郑州 450011; 2. 河南省水利勘测设计院, 河南 郑州 450008;
3. 石家庄市水利防洪生态工程指挥部, 河北 石家庄 050071; 4. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要:多沙河流生态需水量中最为重要的是输沙需水量,通过分析河道输沙的实际过程,提出了输沙需水量概念和计算方法,进而计算、分析了永定河下游河道的输沙需水量。指出输沙用水调控原则为:优先选用临界单位输沙需水量;在水流强度较大时集中输沙,保证下游河道维持相对稳定的流量。

关键词:生态需水量; 输沙流量; 淤积比

中图分类号: TV211.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1379(2006)02-0051-03

生态需水量是特定区域内生态系统需水量的总称,包括为保护和恢复植被及生态环境用水、水上保持用水、维持河流水沙平衡的水量、地下水回补水量等,其中最为重要的是维持河流水沙平衡的水量。鉴于中国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。河流输沙功能衰竭将导致河道淤积加剧、河流系统功能丧失,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。

1 输沙需水量的研究现状

1.1 输沙需水量概念

输沙需水量可以定义为: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。单位输沙水量可以定义为:在一定水沙条件及河床边界条件下,将单位质量泥沙输移至下一河段所需的水量。高效输沙水量则是指在一定水沙条件和河床边界条件下,将一定量的泥沙输移至下一河段所需要的最小水量,且此时输沙效率与河道淤积情况最优。

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^[1-3],但是实际情况下,净水量并不总是全部用来输沙,只有在平衡状态或淤积情况下,净水量才全部用于输沙。输沙需水量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^[4]。

1.2 输沙需水量计算方法

处于冲淤平衡临界状态时,河道不冲不淤或者冲刷量与淤积量相等。对天然河道而言,河道冲淤比为零时显然不冲不淤,即河道处于冲淤平衡状态。但是对于多沙河流而言,其下游河道淤积比往往大于1,河道常处于淤积状态,而且冲淤平衡状态是一个范围,难以精确把握。因此,应考虑河性适当放宽对淤积性河道冲淤平衡状态的要求,如认为淤积比为10%或

20%时河道近似处于冲淤平衡状态(即 $\eta'_{\text{临界}} = 0.1$ 或0.2)。此时输移一定量泥沙所需的输沙水量就是冲淤平衡临界状态时的输沙水量(即高效输沙水量)。当淤积比大于10%或20%时,认为河道处于淤积状态。

实际水量、输沙需水量和高效输沙水量之间的关系见图1。由图1可知:①河段淤积比随实际水量的增大而减小,也随输沙需水量的增大而减小;②同一淤积比下,输沙需水量小于实际水量,而且其差值随实际水量的增大而增大、随淤积比的增大而减小;③多沙河流一般淤积较为严重,视河道淤积程度及用水要求的不同,河道冲淤平衡的标准可定为淤积比为0、10%、20%,这3个淤积比所对应的实际水量即分别为这3种冲淤平衡情况下的临界水量,这3个淤积比所对应的输沙需水量即分别为这种冲淤平衡情况下的高效输沙水量;④对于河段淤积比为100%的极端情况,上游来沙全部淤积于下游河道,实际水量全部用于输沙,输沙需水量在数值上与实际水量相等。

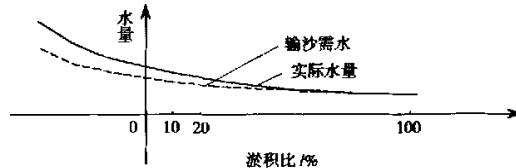


图1 实际水量、输沙需水量和高效输沙水量之间的关系

输沙需水量可以由下式计算^[4]:

$$W' = \eta^a W_0 \quad (1)$$

$$W_0 = W - W_s / \gamma_s \quad (2)$$

式中: W' 为输沙需水量, m^3 ; η 为输沙效率; a 为指数(其值由输沙效率 η 确定); W_0 为净水量, m^3 ; W 为径流量, m^3 ; W_s 为输沙量, t ; γ_s 为泥沙容重(通常取 $2.65 t/m^3$)。

收稿日期:2005-11-08

基金项目:十五科技重大攻关项目(2001BA610A-01-03-03)。

作者简介:严军(1971-),男,湖北武汉人,博士,主要从事水力学及河流动力学方面的研究及教学工作。

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

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

2 永定河下游河道输沙需水量研究

2.1 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。利用永定河 6 个主要水文站——响水堡、石匣里、官厅、雁翅、三家店和卢沟桥的资料进行计算和分析。

2.2 永定河下游河道水沙特征

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), 计算各水文站相应的径流量、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。各站汛期输沙量和平均含沙量都明显大于非汛期。各站出库沙量大幅度减小。但下游地区过度用水, 可能造成下游各站水量沿程衰减, 也可能造成下游河道淤积, 输沙条件进一步恶化, 甚至导致下游断流。

官厅水库的修建, 使永定河下游河道的水沙特征发生了非常明显的变化。1948~1956 年、1957~1989 年和 1948~1989 年官厅水库汛期、非汛期和全年进、出库径流量、沙量、平均流量及平均含沙量见表 1。

表 1 官厅不同时期进、出库水沙要素统计

时期	1948~1989 年				1948~1956 年				1957~1989 年				
	$W/\text{亿 m}^3$	$W/\text{10}^6 \text{t}$	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	含沙量 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$W/\text{亿 m}^3$	$W/\text{10}^6 \text{t}$	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	含沙量 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$W/\text{亿 m}^3$	$W/\text{10}^6 \text{t}$	流量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	含沙量 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	
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 年官厅水库汛期、非汛期和全年入库和出库流量均有所减小。径流量的减小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。

2.3 永定河下游河道冲淤特征

1948~1989 年官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期及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。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表达为

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

$$\Delta W_s/W_s = -178.821 \ln Q + 602.62 \quad (5)$$

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

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。

根据式(4)~式(6), 可计算出官厅—卢沟桥河段淤积比为 0.10%、20% 时, 官厅水库汛期临界出库流量分别为 56.21、47.79、40.62 m^3/s ; 非汛期临界出库流量分别为 29.08、27.50、26.00 m^3/s ; 全年临界出库流量分别为 41.15、35.55、30.70 m^3/s 。因非汛期出库沙量远小于汛期, 官厅水库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—卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

官厅—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—卢沟桥河段淤积比为

10% 时, 官厅水库汛期出库流量大于多年平均出库流量, 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—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。

2.4 永定河下游河道输沙需水量特征

2.4.1 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—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。

官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅水库对应时期出库输沙流量之间的关系可分别表达为

$$\Delta W_s/W_s = -19.862 \ln Q' + 34.409 \quad (7)$$

$$\Delta W_s/W_s = -167.060 \ln Q' + 484.370 \quad (8)$$

$$\Delta W_s/W_s = -21.295 \ln Q' + 70.501 \quad (9)$$

式中: $\Delta W_s/W_s$ 为官厅—卢沟桥河段淤积比; Q' 为官厅水库出库输沙流量。

根据式(7)~式(9), 可计算出官厅—卢沟桥河段淤积比为 0.10%、20% 时, 官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为 34.31、20.80 和 12.57 m^3/s ; 非汛期临界出库输沙流量分别为 18.16、17.11、16.11 m^3/s ; 全年临界出库输沙流量分别为 27.40、17.13、10.71 m^3/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。官厅—卢沟桥河段淤积比为 0.10%、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)官厅水库出库临界流量和临界输沙流量发现:①相同条件下官厅水库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传输。②官厅—卢沟桥河段淤积比与官厅水库出库流量的关系点据较为分散,但与官厅水库出库输沙流量的相关关系较为密切。这一方面表明实际流量并非全部用于泥沙传输;另一方面表明输沙流量比实际流量更能揭示泥沙传输的实质。

2.4.2 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、非汛期及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。

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表达为

$$\Delta W_s/W_s = -1.283 \ln q' + 64.731 \quad (10)$$

$$\Delta W_s/W_s = -55.592 \ln q' + 230.780 \quad (11)$$

$$\Delta W_s/W_s = -0.9068 \ln q' + 52.281 \quad (12)$$

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。

根据式(10)~式(12),可计算出官厅—卢沟桥河段淤积比为0、10%、20%时,官厅汛期临界单位输沙需水量分别为52.28、44.21、36.13 m^3/t ;非汛期临界单位输沙需水量分别为63.52、53.06、44.33 m^3/t ;全年临界单位输沙需水量分别为57.65、46.63、44.33 m^3/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。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。

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表达为

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

式中: Q' 为输沙流量, m^3/s ; W' 为输沙需水量, m^3 ; t 为时间, s ; W_s 为输沙量, t ; q' 为单位输沙需水量, m^3/t 。

由式(13)可知: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。

3 输沙用水调控原则

3.1 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,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。

3.2 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水库出库水沙组合,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。

4 结语

北方多沙河流生态需水量中最重要的是输沙需水量。官厅—卢沟桥河段淤积比为0、10%、20%时,官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为34.31、20.80、12.57 m^3/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输沙需水量进行调控。

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 [M].北京:中国建材工业出版社,1993.
- [2] 赵华侠,陈建国,陈建武,等.黄河下游洪水期输沙用水量与河道泥沙冲淤分析[J].泥沙研究,1997,(3).
- [3] 费祥俊.高含沙水流长距离输沙机理与应用[J].泥沙研究,1998,(3).
- [4] 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[J].泥沙研究,2004,(4).

【责任编辑 张华岩】

(上接第22页)验证结果表明,该模型能够很好地模拟黄河下游河段月旬水量传播过程,很大程度地提高了水量调度的精度。目前在黄委水量调度系统中运行的方案管理编制子系统正是采用该模型进行河道流量演进的计算方法;另一方面,该模型在处理50 m^3/s 以下极小流量时尚显不足。随着水调工作的继续及相关研究的深入,对模型结构、参数构成等方面可以继续改进。

参考文献:

- [1] 蔡治国,王光谦,魏加华.黄河流域水量调度的自校正控制模型[J].清华大学学报,2004,(12).
- [2] 黄河勘测规划设计有限公司,黄委水文局,黄委水资源管理与调度局,等.“九五”国家重点科技攻关计划“黄河水资源实时水量分配研究”报告[R].郑州,2002.
- [3] 黄委水资源管理与调度局,黄河勘测规划设计有限公司,黄委水文局.黄河小浪底以下河段枯水调度模型研究开发报告[R].郑州,2004.
- [4] 陈良程,蔡治国,王小霖,等.黄河流域水量调度方案编制方法研究[J].应用基础与工程科学学报,2003,(2).

【责任编辑 翟戎亮】