

泥沙输移比问题的分析研究*

王协康 敖汝庄 喻国良 方 铎

(四川大学,成都,610065)

摘 要 泥沙输移比定义一直存在着不够准确清晰的缺点,对泥沙输移比概念及其影响因素进行了更深入的探讨是非常有必要的。首次在泥沙输移比公式中引入粒径、时段因子,用量纲分析推求了不同区域的泥沙输移比公式。从理论上阐明泥沙输移比并不是单纯与整个流域面积成反比,而是与流域产沙面积成反比。

关键词 泥沙输移比 量纲分析 侵蚀特性

泥沙输移比的概念,是 C. B. Brown 在 1950 年为估计美国入河、入海的泥沙量而提出的。本文从泥沙输移比的概念及其影响因子入手,得到了在理论上较满意的泥沙输移比定义及其计算公式,对公式的结构进行了更深入的分析。当前,泥沙输移比对正确评价水土保持效益和下游治理的决策有着重要的意义。在上游流域土壤侵蚀可以估算的情况下,如果能通过准确的方法或公式计算泥沙输移比,就能预报下游的输沙量并满足中小流域的综合治理规划、防治土壤侵蚀、为合理利用水沙资源的工程建设提供设计依据。

1 泥沙输移比概念

关于泥沙输移比的定义,一直存在着不够准确清晰的缺点。如牟金泽等认为河流某一断面实测沙量与面上全部总侵蚀量之比^[1];曾伯庆认为流域出口实测泥沙量为输沙量,流域各地类总侵蚀量为产沙量,泥沙输移比即为输沙量与产沙量之比^[2]。虽然上述说法不尽相同,但基本上可用下式表示:

$$SDR = Y / T$$

式中 SDR 为泥沙输移比; Y 为流域出口控制断面的实测产沙量; T 为控制断面以上流域总侵蚀量。

尽管人们都在应用上述泥沙输移比定义,但它没有体现流域土壤侵蚀产沙输移时空变化,尤其难以描述各粒径级泥沙侵蚀输移关系。为此,对上述定义给予必要的限制条件,使流域泥沙输移比定义更明确,看来是有其实际意义的。

(1) 空间范围:流域本身是一个空间。空间的大小,特别是空间内部的自然条件的差异对泥沙输移比的影响是很大的,必须把讨论的问题限制在某一比较均匀的空间范围内。根据陆中臣等^[3]对流域地貌系统的论述,暂且把流域空间划分为坡面系统、沟道系统、三角洲系统。

(2) 时间范围:泥沙侵蚀输移量是时变因子,没有明确的时段限制,必将失去度量的标准。如在坡面上雨滴对土壤的溅蚀量,在一定时段内,坡面上来不及形成径流,一般不可能把雨滴溅蚀量输移到沟谷地带,此时,坡面上泥沙输移比就失去了其本身的意义。另外,流域侵蚀产生的泥沙与水流输沙能力也不总是平衡的。因此,应根据空间区域的输沙特点来约定时段范围。

(3) 泥沙粒径:泥沙根据其运行形式,可分为悬移质、推移质;按其来源,又可分为冲泻质和床沙质等。但它们是以水流条件为基础的相对变量,难以真正体现泥沙本身的固有属性。一般认为,冲泻质的泥沙输移比为 1,但不同区域及水流条件冲泻质的划分粒径并不一致,因此,有必要用一个真正反映泥沙物理特征的量来描述。泥沙粒径就是一个这样的特征量。在求流域泥沙输移比时,应明确是求大于、小于或等于某一粒径的泥沙输移比,如果泥沙输移比的计算公式不能反映这一点,则失去其实用价值。

由此可以认为,泥沙输移比的定义应是:一定时段和空间范围内流域某过水断面输出某一粒径的泥沙量与断面以上流域侵蚀同粒径泥沙量之比。

2 泥沙输移比计算因子的分析

泥沙输移比涉及流域土壤侵蚀与产沙,即包括泥沙的侵蚀、输移和沉积等子过程。在每个子过程中,又有许多更次级的基本过程。影响流域泥沙输移比的主要因素为:地貌因素:坡长、坡度、坡形及坡向;地质条件:土壤颗粒的岩性及其抗蚀性;下垫面条件:植被、土壤含水量等;水文气候条件:地面径流、降雨强度、降雨分布、降雨类型、降雨历时等。泥沙输移比公式应能合理估算出控制断面以上的流域总侵蚀量,一般可考虑两种不同方法:

* 本文是“九五”三峡工程泥沙问题研究资助项目(编号:95-4-1-4)

一是在流域内坡面、沟谷泥沙侵蚀模数相近的情况下,采用“通用土壤流失公式”^[9]计算流域的土壤总侵蚀量,即

$$T = RKLSCP$$

式中 R 为降雨能量因子; L 为坡长因子; C 为耕作管理因子; K 为土壤可侵蚀性因子; S 为坡度因子; P 为水土保持措施因子。

另一种方法是当坡面和沟谷泥沙侵蚀模数相差悬殊时,对沟谷面积与流域总面积有相当大比例的地区和流域,采用流域总侵蚀量等于坡面侵蚀(VP)、沟壑侵蚀(GU)和沟道侵蚀(CH)之和^[12],即

$$T = VP + GU + CH$$

由于影响泥沙输移比的因子众多,不同学者从不同的观点和角度出发,提出了不同的公式。多数公式以地形、地貌为泥沙输移比的决定性因素。对于影响泥沙输移比的地质因素、泥沙粒径及水文气候因子时空变化的影响考虑较少。因而给流域间泥沙输移比的应用与比较带来困难。为此,下面着重探讨地质因素、泥沙粒径以及水文气候因子时空变化特性对泥沙输移比的影响。

2.1 地质因素对泥沙输移比的影响

地质因素对泥沙输移比的影响,主要反映在流域的地表岩性和产沙颗粒上。河流泥沙主要来自地面侵蚀物质,而地面侵蚀物质取决于其下垫面岩性。不同岩性的抗风化力、产沙粒径及组成的不同,将影响到地面侵蚀物质和河流输沙量的不同,泥沙输移比亦将有所不同。

2.1.1 不同岩石的侵蚀属性

岩石的侵蚀属性在很大程度上取决于岩石的抗蚀性能。岩石的抗蚀性能指岩石抵抗崩解、破坏和被搬运的能力。其中,孔隙率 n 、吸水率 w 和饱水系数 k_s , 可间接反映岩石的抗风化性能和抗冻性能。 n , w , k_s 越大,岩石越易受风化破碎。抗剪断强度 σ_c 、内聚力 C 和内摩擦系数反映岩石抵抗剪切破坏的强度,可直接用来评价岩石边坡的稳定性。 σ_c , C 和 k_s 越大,岩石抗剪切破坏强度越大,边坡越稳定。与其它岩类相比,石英岩、石英砂岩、灰岩、白云岩、花岗岩、流纹岩等具有较强的抗风化破坏能力;其次是砂岩和片麻岩;凝灰岩、砂质页岩和页岩的抗蚀能力较弱。

2.1.2 不同岩性流域的侵蚀特性

流域河流频度 F 和河网密度 D_d 常被用来表示流域侵蚀切割程度。河流频度指单位流域面积中河流的数量。河网密度指单位流域面积中河流的总长

度。 F 和 D_d 越大,流域侵蚀切割越严重,反映流域地面组成物质抗蚀能力越弱;反之亦然。Schumm^[4]曾利用河流平均流域面积与平均累积河流长度探讨地貌演化阶段与河流给养常数的关系,并以河流给养常数 C_d 用来表征流域侵蚀切割程度。河流给养常数是指为了维持单位河流长度所需要的最小流域面积,它等于河网密度的倒数。Schumm 认为, C_d 值越大,流域越难侵蚀切割;反之亦然。卢金发^[5]对燕山地区的研究得到了反映侵蚀切割程度指标与岩性的关系,见表 1、表 2,并参照 Vanoni 侵蚀参照流域概念,计算不同岩性泥沙输移比,见表 3。由表 1、表 2、表 3 可知:流域岩性不同,其侵蚀强度与泥沙输移比有很大的区别。

表 1 燕山地区不同岩性小流域 F 、 D_d 和 C_d 值

流域形态指标	岩 性					
	片麻岩	花岗岩	石英正长斑岩	砂岩、砂砾岩、粉砂岩	白云岩、石英岩、石英砂岩	安山岩、流纹岩、火山角砾岩
河流频率 F /条 km^{-2}	3.82	2.78	2.14	3.80	2.65	2.81
河网密度 D_d / $\text{km} \text{ km}^{-2}$	3.04	2.43	1.89	3.17	2.58	2.72
河流给养常数 $C_d / \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	328.1	411.7	535.7	313.9	388.7	367.3

表 2 燕山地区不同岩性流域侵蚀模数值表

岩 性	白云岩、石英岩、安山岩、流纹岩	花岗岩	砂岩、砂砾岩、片麻岩	凝灰岩、粉砂岩
侵蚀模数 / $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{y})^{-1}$	< 500	500 ~ 1 000	1 000 ~ 3 500	3 500 ~ 9 000

表 3 燕山地区不同岩性流域泥沙输移比计算

岩性	流 域 面 积 / km^2				
	0.1	1.0	10	50	100
SDR / %					
a	47.2	32.4	22.3	17.1	15.3
b	61.4	42.1	28.9	23.3	19.9
c	68.4	46.6	31.8	24.3	21.7

注:a 为白云岩、石英岩、安山岩、流纹岩、花岗岩;b 为砂岩、砂砾岩、片麻岩;c 为凝灰岩、粉砂岩。

2.2 泥沙粒径对泥沙输移比的影响

泥沙在流域内的输移,取决于水流的挟沙能力、泥沙来源及其物理属性(如粒径、比重、形状等),泥沙在流域内的冲淤变化趋势间接地反映了泥沙输移规律。陈建国等研究了三门峡~高村、高村~利津两河段在不同洪峰条件下不同粒径泥沙冲淤状况,得出了随着来沙粒径变粗,泥沙输移距离越来越短,对下游河段的影响越来越小的结论^[6]。

许炯心^[7]以实测水文资料为基础,对于黄河下游河道泥沙输移比进行了系统的研究。指出粗泥沙(大于 0.05 mm)的相对来量越大,河道输移比越小,

细泥沙(小于 0.05 mm,特别是小于 0.025 mm)的相对来沙量越大,排沙比越大。由此可知,粒径对泥沙输移比的影响是一个不可忽略的重要因子。

2.3 时变因子下垫面条件对泥沙输移比的影响

植被对土壤侵蚀的影响作用主要有: 减免暴雨直接打击地表面; 枯枝落叶层吸收水分减少地表径流与冲刷; 增加地面粗糙度,减缓流速; 林草根系密集成网,增强地表抗蚀强度。

随着季节的变化,流域植被的郁被度和覆盖度呈周期性变化,因而不同的季节,下垫面条件对泥沙输移比的影响会有所不同。F. S. Ebiseniju^[8]以野外 19 个小实验流域为基础,借用植被覆盖度分成两类,得到不同下垫面条件的泥沙输移比公式为:

植被覆盖度为 22 %

$$\lg SDR = 2.101 - 0.112\lg S_0 - 0.080\lg f$$

$$(R^2 = 0.9253, F = 14.52)$$

植被覆盖度为 75 %

$$\lg SDR = 1.992 - 0.411\lg L + 0.092\lg ER$$

$$(R^2 = 0.8475, F = 15.62)$$

式中 S_0 为平均坡度(度); L 为平均坡长(m); ER 为土壤侵蚀因子; f 为土壤下渗率(mm/h); R 为复相关系数; F 为回归方程 F 检验值。

2.4 空间尺度对泥沙输移比的影响

国内外不少学者认为,泥沙输移比随着流域面积的增加而减小。美国一些研究者提出泥沙输移比(SDR)与流域集水面积的 0.2 次幂成反比^[9]。景可^[10]曾选取了下垫面情况、地质构造特征、降雨特性有类似情况的黄河支流上 16 个流域的年平均输沙模数与流域面积进行了研究,如图 1 所示。该图显示:泥沙输移比与面积并非某种单一的关系,间接地说明了泥沙输移比与面积的相关程度并不明显。

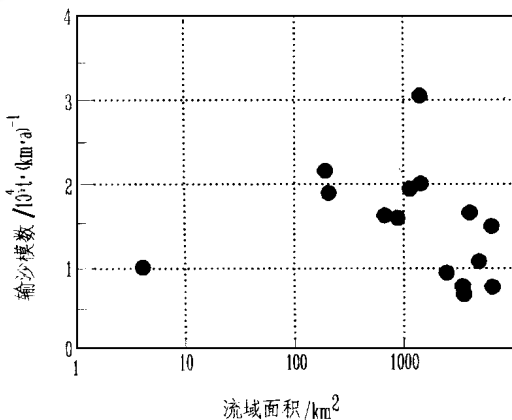


图 1 黄土高原输沙模数与流域面积关系图

2.5 时间尺度对泥沙输移比的影响

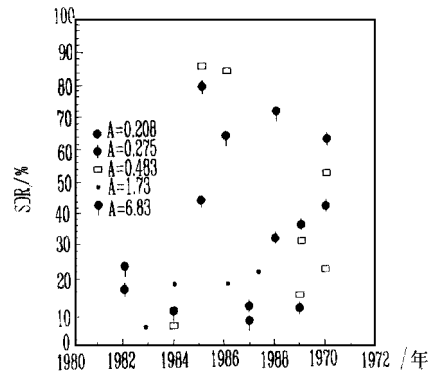
许多影响泥沙输移比的因子是时变因子,如降

雨强度、径流量、土壤前期含水量、下垫面植被条件等随着时段不同而差别较大。在以水力侵蚀为主的地区,径流量对土壤侵蚀及输沙起着关键性的作用,径流量随时段的变化,必将导致泥沙输移比随时段的变化。此外,植被条件也是随水文气候变化的时变因子,在不同的季节具有不同的生长特征。J. M. Sherida et. al.^[11]研究了给定区域的泥沙输移比随时段的变化,见表 4。

表 4 泥沙输移比随时段(月份)变化表

年份	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	SDR / %											
1974									8.2	2.5	0.2	8.7
1975	8.7	44.6	7.1	10.8	6.9	3.5	2.5	1.3	1.5	0.2	0.2	3.1
1976	9.4	33.9	19.7	4.5	4.2	5.6	2.8	1.9	4.2	6.6	3.0	36.9

由表 4 可以看出:在给定流域,泥沙输移比与时段的选择具有密切的关系。若以月份为统计时段,泥沙输移比的变化相当大。过去不少学者以一年为时段研究泥沙输移比, J. R. Williams et. al.^[12]对 5 个不同小流域的年时段泥沙输移比进行了研究,根据其结果点绘泥沙输移比年际变化见图 2 所示。由图 2 可知,泥沙输移比的年际变化较大。由上述分析可知,时间尺度是泥沙转移比度量不可缺少的因子。



面积 A 为平方英里 (1 平方英里 $\approx 2.6 \text{ km}^2$)

图 2 泥沙输移比年际变化示意图

3 泥沙输移比公式推求及合理性分析

由上述分析可知,整个流域坡面系统和沟道系统的土壤侵蚀输移机理有着很大的差别,其各自的影响因子相差甚远,因此对泥沙输移比的研究应区别考虑。

3.1 坡面系统的泥沙输移比

目前,对于坡面流输沙规律研究较少,比较具有代表性的工作是 Julien 的因次分析和 Guy 的试验研究。Julien^[13]在分析坡面水流运动因子后,利用量纲

分析,得出坡面流输沙能力主要与坡度、坡长、单宽流量及降雨强度有关,可用下式表示:

$$q_s = kS_0^a q^b I^c \quad (1)$$

式中 q_s 为单宽输沙能力 (kg/ms), q 为单宽流量 (m^2/s); I 为雨强 (m/s); k 为系数; a 、 b 、 c 为参数。此外,根据本文对坡面侵蚀影响因子的分析,坡面侵蚀量的函数关系式可表示为:

$$D_f = f(S_0, L, ER, r_s, d_s, P, f, I, r, V_f, h, B, A_1, T_1) \quad (2)$$

式中 D_f 为坡面侵蚀量 (kg/s); d_s 为泥沙粒径 (m); P 为植被覆盖度; I 为雨强 (m/s); A_1 为坡面面积 (m^2); T_1 为计算时段 (s) (如降雨历时,汇流历时); V_f 为坡面流速 (m/s); h 为坡面水深 (m); B 为坡面平均宽度 (m); r 、 r_s 分别为水、沙密度 (kg/m^3)。

对(2)式进行因次分析可得

$$f\left(\frac{D_f}{rV_f h B}, S_0, \frac{L^2}{A_1}, ER, P, \frac{r_s}{r}, \frac{R_0}{d_s}, \frac{I}{f}\right) = 0 \quad (3a)$$

式中 R_0 为 T_1 时段坡面平均径流深 (m),在假定 r_s/r 为常数时,由上式得

$$\frac{D_f}{rV_f h B} = S_0^{a_1} (L^2/A_1)^{a_2} ER^{a_3} \cdot P^{a_4} (R_0/d_s)^{a_5} (I/f)^{a_6} \quad (3b)$$

进一步可变换为

$$\frac{D_f}{BkS_0^a q^b I^c} = S_0^{b_1} (L^2/A_1)^{b_2} ER^{b_3} \cdot P^{b_4} (R_0/d_s)^{b_5} (I/f)^{b_6} \quad (4)$$

由式(1)及泥沙输移比定义可得,在 T_1 时段坡面泥沙输移比计算公式为:

$$SDR_s = S_0^a ER^b P^c (L^2/A_1)^d \cdot (R_0/d_s)^{e_1} (I/f)^{e_2} \quad (5)$$

式中 SDR_s 为坡面系统泥沙输移比; k 为系数; a 、 b 、 c 、 d 、 e_1 、 e_2 为参数。其中 S_0 反映了坡面的地形因素; P 反映了坡面的植被条件; I/f 反映了降雨有效侵蚀程度; R_0/d_s 反映了在 T_1 时段内泥沙粒径的暴露程度; L^2/A_1 反映了坡面流域的形态要素,若流域为方形,形态要素为 1,随着流域的拉长而降低,间接反映了坡面流域的汇流输沙效率。由此可认为(5)式基本反映了坡面系统土壤侵蚀输移特性,该公式可用于研究坡面系统泥沙输移比计算。

3.2 沟道系统的泥沙输移比

沟道水流与坡面流输沙条件显著不同之处在于坡面流中很难区分悬移质和推移质,而沟道水流的挟沙能力必须对不同泥沙运动方式分别加以考虑。因此,对沟道系统泥沙搬运特性分悬移质和推移质输移来研究,从其输沙能力量化各自的泥沙输移比。

3.2.1 悬移质运动的泥沙输移比

通过分析悬移质输移的影响因素,对其挟沙能

力 G_s 可写成如下函数形式

$$G_s = f(J, R_d, r_s, d_s, S_s, r, u, B, h, r_s, A_2, T_2) \quad (6)$$

式中 G_s 为悬移质输沙率 (kg/s); J 为沟道比降; R_d 为沟道密度 (m^2); S_s 为坡面来沙量 ($kg/m^2 s$); u 为沟道水流流速 (m/s); B 为沟道平均宽度 (m); h 为沟道平均水深 (m); r_s 为泥沙沉速 (m/s); A_2 为沟道流域面积 (m^2); T_2 为计算时段 (s); (如洪水历时)。对式(6)因次分析可得

$$f\left(\frac{G_s}{r u h^2}, J, R_d, B, \frac{r_s}{r}, \frac{h}{d_s}, \frac{S_s(1-R_d B) A_2}{r(1-R_d B) u h^2}, \frac{T_2 u B}{u h^2}\right) = 0 \quad (7a)$$

进一步可化为

$$f\left(\frac{G_s}{r u h^2}, \frac{r_s}{r}, \frac{S_s(1-R_d B) A_2 R_d B T_2 B^2}{r(1-R_d B) h d_s^5} \cdot \frac{u h I}{S_s}\right) = 0 \quad (7b)$$

若沟道水流悬移质挟沙能力采用 Xoper 公式形式^[14],即

$$S_m = k R J U / r_s \quad (7c)$$

式中 S_m 为挟沙能力 (kg/m^3); R 为水力半径 (m); (近似以 h 代替); U 为平均流速 (m/s)。

在把 r_s/r 看作常数情况下,由式(7b)、(7c)可得

$$\frac{G_s}{S_s(1-R_d B) A_2} = \frac{T_2 B^2 u^2 h^2 J R_d B}{(1-R_d B) r_s d_s^5} \quad (8)$$

式中 $S_s(1-R_d B) A_2$ 为坡面来沙量,由泥沙输移比定义得

$$SDR_{gs} = \frac{T_2 Q_2 J}{r_s d_s^5} \frac{R_d B}{1-R_d B} \quad (9)$$

式中 k 为系数; Q_2 为单位径流量; SDR_{gs} 为沟道悬移质泥沙输移比。其中 $T_2 Q_2$ 反映了流域产流量,间接体现了流域侵蚀产沙能力; $Q_2 J$ 反映了沟道水流功率,也是水流输沙能力的体现; r_s 反映了悬移质泥沙沉降速度; $R_d B / (1-R_d B)$ 反映了流域内输沙面积与产沙面积的比值。由此可认为沟道悬移质泥沙输移比与产流量、水流功率成正比;与泥沙的粒径及沉降速度成反比;与 $R_d B / (1-R_d B)$ 成正比,也就是说,与流域沟道面积成正比,而与产沙面积成反比。所以过去许多研究者认为与整个流域面积成反比是不够确切的。该公式基本上反映了沟道悬移质侵蚀输移的机理。

3.2.2 推移质运动的泥沙输移比

由于推移质运动方式与悬移质泥沙截然不同,通过分析推移质运动的影响因素,对其输沙率 G_b 可写成如下函数式

$$G_b = f(J, R_d, r_s, d_s, S_b, r, U, U^*, h, \tau_0, c, B, A_2, T_2) \quad (10)$$

式中 G_b 为推移质输沙率 (kg/s); R_d 为沟道密度 (m/m^2); S_b 为坡面来沙量 (kg/m^2s); U 为沟道水流流速 (m/s); U^* 为摩阻流速 (m/s); τ_0 为床面切应力 (kg/m^2); c 为床面起动切应力。对式 (10) 进行因次分析可得:

$$f\left(\frac{G_b}{(r_s - r) U h^2}, J, \frac{\tau_0}{(r_s - r) d_s}, \frac{\tau_0 - c}{(r_s - r) d_s}, \frac{U}{U^*}, \frac{S_b(1 - R_d B) A_2 T_2 R_d B}{(r_s - r) d_s^3 (1 - R_d B)}, \frac{B}{h}\right) = 0 \quad (11)$$

山地区域沟道比降较大, G. M. Smart^[15] 利用实验资料认为, Meyer-Peter-Muller 公式对陡坡沟道推移质输沙率的计算明显偏小。利用实验资料得到了应用性较好的无量纲形式为

$$\frac{g_b}{g \left(\frac{r_s - r}{r}\right) d_s^3} = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} J^{0.6} \frac{U}{U^*} \left[\frac{\tau_0}{(r_s - r) d_s}\right]^{0.5} \cdot \frac{\tau_0 - c}{(r_s - r) d_s} \quad (12)$$

以 (12) 式为基础, 则 (11) 式可化为

$$\frac{G_b}{S_b(1 - R_d B) A_2} = K \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} J^{0.6} \frac{U}{U^*} \left[\frac{\tau_0}{(r_s - r) d_s}\right]^{0.5} \cdot \frac{\tau_0 - c}{(r_s - r) d_s} \frac{T_2 U h B}{d_s^3} \frac{R_d B}{1 - R_d B} \quad (13)$$

式中 $S_b(1 - R_d B) A_2$ 为坡面来沙量 (kg/s), 由泥沙输移比的定义得

$$SDR_{gb} = K \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} J^{0.6} \frac{U}{U^*} \left[\frac{\tau_0}{(r_s - r) d_s}\right]^{0.5} \cdot \frac{\tau_0 - c}{(r_s - r) d_s} \frac{T_2 Q_2}{d_s^3} \frac{R_d B}{1 - R_d B} \quad (14)$$

式中 SDR_{gb} 为沟道推移质泥沙输移比; K 为系数, d_{90} 、 d_{30} 分别为非均匀沙以重量计 30% 和 90% 较之为小的粒径。其中 J 反映了沟道纵断面的形态变化, 间接反映了沟道水流的挟沙能力; d_{90}/d_{30} 反映了泥沙的非均匀程度; $\tau_0/(r_s - r) d_s$ 和 $(\tau_0 - c)/(r_s - r) d_s$ 反映了输沙的水流强度; U/U^* 是以流速分布形式表示的阻力参数, 它与表示水流阻力的其它参数可以相互转化 ($U/U^* = C_1/\sqrt{g} = R^{1/6}/n\sqrt{g} = \sqrt{8}/f$, 式中 C_1 为谢才系数, n 为曼宁系数, f 为达西—韦斯巴赫阻力系数, R 为水力半径, g 为重力加速度)。由此可以认为沟道系统泥沙输移比与其推移质输沙能力、流域时段产流量、沟道面积成正比; 与

流域产沙面积、泥沙粒径成反比。因为该公式基本上反映了沟道系统推移质输移的主要影响因素, 因而在理论上说是比较合理的。

4 结 语

(1) 对泥沙输移比概念进行了探讨, 认为其定义应为: 一定时段和空间范围内流域某过水断面输出某一粒径级的泥沙量与断面以上流域侵蚀同粒径范围的泥沙量之比。

(2) 较全面分析了影响泥沙输移比的因素, 首次在泥沙输移比公式中引入了粒径、时段因子, 并得出了不同区域影响泥沙输移比的因素各不相同的结论。将流域划分为坡面系统及沟道系统, 利用因次分析法分别推求其泥沙输移比公式, 从理论上阐明了泥沙输移比并不是单纯与整个流域面积成反比, 而是与流域产沙面积成反比。

(3) 由于取得完整的实验或野外实测泥沙输移的资料困难, 有待于继续收集资料, 以便对这些公式加以验证。

参 考 文 献

- 1 牟金泽、孟庆枚. 论流域产沙计算中的泥沙输移比. 泥沙研究 1982 (2), 60 ~ 65
- 2 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀与水土保持防护体系. 中国水土保持, 1983 (6), 27 ~ 30, 342 ~ 345
- 3 陆中臣、贾绍凤、黄克新等著. 流域地貌系统, 大连: 大连出版社, 1991 年 5 月, 32 ~ 42, 135
- 4 S. A. Schumm. Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badland at Parth Amboy, New Jersey. Bull. Geol. Soc. Amer, 1956 (67) 606 ~ 607
- 5 卢金发. 燕山地区流域侵蚀产沙与流域地质地貌的初步研究. 泥沙研究, 1989 (1), 25 ~ 33
- 6 陈建国, 周文治, 李宜斌等. 黄河下游各级洪峰不同粒径泥沙冲淤特性分析. 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集, 北京: 中国水利学会泥沙专业委员会编, 北京: 中国建材工业出版社, 1995, 483 ~ 490
- 7 许炯心. 黄河下游排沙比的研究. 泥沙研究, 1997 (1) 49 ~ 54
- 8 Ebiemiju, F. S. sediment delivery ratio prediction equations for short catchment slopes in a humid tropical environment. J. Hydrology, 1990 (114), 191 ~ 208
- 9 V. A. 范诺尼主编. 泥沙工程. 黄河水利委员会水利所及长办水利院等译, 北京: 水利出版社, 1981 年, 330~346, 346~350
- 10 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究. 陈永宗等主编, 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集, 北京: 水利电力出版社, 1989, 14 ~ 26
- 11 J. M. Sheridan, C. v. Booram Jr., L. E. Asmussen. Sediment-Delivery Ratios for a Small Coastal Plain Agriculture Watershed. Trans. ASCE, 1982, 25 (3), 610 ~ 615
- 12 Williams J. R. and Berndt, H. D. . Sediment yield computed with universal equation. J. Hydr. Div. ASCE, 1972, 98 (2) 2087 ~ 2098
- 13 Julien, P. Y. and D. B. Simons. Sediment transport capacity of

(下转第 67 页)

3.9 补气试验

试验的主要目的是确定补气对机组稳定性和效率的影响程度。

试验在对应于 135 m 和 189 m 水头、带部分负荷及电站空化系数工况下进行。空气由转轮下环底部的水轮机轴中心孔补入。通过补气,电站整个水头段内的压力脉动振幅值均小于合同规定的保证值 5%。补气量与机组的运行工况有关,经试验得出的补气量与水轮机流量的最佳比值($Q_{\text{air}}/Q_{\text{water}}$)为 0.15%。若水轮机按此比值补气运行,对效率影响不大,仅下降约 0.25%。补气后,尾水管内压力脉动的混频幅值均减小到 2% 以下。

试验还表明,补气系统仅在导叶 $12^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 开度范围内并出现最大压力脉动的工况下才需要投入。

3.10 蜗壳测流压差试验

按合同要求及蜗壳压差测量法的规定,在蜗壳上选定两个不同的测流断面,并在每个断面上测量水轮机的流量。此项试验的目的是为现场指数试验的相对流量公式取得数据。通过试验,获得的用于验证现场指数的最终相对流量公式为:

$$\log Q = 0.51176 \log H + 1.08073.$$

3.11 水力流道的尺寸检查

(上接第 30 页)

允许误差范围内, $2290 \times (1.0 + 0.05) = 2405$ kN,基本与设计锁定吨位吻合。因此,可以认为,以 2400 kN 为锁定吨位的主要目的,是保证在边坡稳定的前提下,使锚索处于完全弹性范围内,将锚索的应力松弛损失和徐变量降到最低限度。

在进行无粘结岩锚施工中,进行锚固灌浆使岩石和锚索成为整体,故在张拉时产生的徐变值可视作此整体的徐变值。而在设计荷载 3300 kN 和 3750 kN 时,经过 180 min 的徐变观测,徐变呈非线性变化。当 $F = 3300$ kN 时,徐变值为 1.32 mm,徐变度为 34.3×10^{-6} MPa;当 $F = 3750$ kN 时,徐变值为 0.68 mm,徐变度为 15.5×10^{-6} MPa。徐变度满足混凝土徐变度变化范围 $(3 \sim 36) \times 10^{-6}$ MPa,也就是说,在超张拉状态下,所发生的徐变是正常的。

7 结 语

(上接第 20 页)

overland flow. Trans. ASAE, 1985, 28(3), 755 ~ 762
14 钱宁,万兆惠著. 泥沙运动力学. 北京科学出版社, 1983, 24, 284, 356
15 G. M. Smart. Sediment Transport Formula for Steep Channel. J. Hydraulic Engineering, 1984, 110(3), 267 ~ 277

所有模型过流部件均按业主选定的项目进行了实物尺寸检查,同时还验证了导叶和转轮的型线。

4 结 语

二滩电站水轮机模型试验在业主代表目击下,于 1994 年 11 月 6 日至 12 月 2 日在 GE 公司位于加拿大蒙特利尔市拉辛的水力试验室进行。试验期间,各测试项目均严格按合同规定的程序和条件进行,试验中记录和获得的数据是真实和有效的。

各项试验均严格按合同技术规范、IEC 出版物 193(1965)、193A 及其第一次补充(1972)和 1 号修正(1977):“水轮机模型验收试验的国际规范”进行。试验期间,主要对模型水轮机的效率、空蚀、飞逸转速,补气和水推力等项目进行了测试。试验结果表明,模型水轮机的效率、能量、空蚀、轴向水推力、导叶水力矩等主要指标达到合同要求,尾水管压力脉动指标基本达到要求,但个别工况下超过了合同规定的指标。

作者简介

金德才 男 二滩工程公司 工程师

(收稿日期:1998-09-03)

(1) 本试验分析了锚索自由端、锚墩和基础变形与荷载的关系,为验证锚索的理论设计提供依据。

(2) 按钢绞线计算伸长值理论,将直线与实测变形线的交点,作为锁定吨位是合理的。

(3) 将预应力混凝土的徐变度变化范围 $(3 \sim 36) \times 10^{-6}$ MPa 引入作为分析岩体锚索徐变度变化的范围,有一定的可行性。

(4) 此锚索正处于断层破碎带上,经试验张拉,效果理想,为下一步进行 3000 kN 锚索施工的安全性提供了依据。

作者简介

李向东 男 中国水利水电第七工程局勘测设计院 工程师

马邦凯 男 中国水利水电第七工程局基础处理公司经理 高级工程师

(收稿日期:1997-10-24)

作者简介

王协康 男 四川大学高速水力学国家重点实验室 博士

敖汝庄 女 四川大学调整水力学国家委员实验室 工程师

喻国良 男 四川大学文选水力学国家重点实验室 教授 博导

方 铎 男 四川大学水利系 教授 博导

(收稿日期:1997-11-10)

ABSTRACT

Analysis on Acceptable Electricity Price for Sichuan Industrial Enterprises

Wang Zunxiang

(Hydroelectric Engineering Society of Sichuan, Chengdu, 610061)

Ma Guangwen

(Sichuan University, Chengdu, 610065)

Abstract At present, electricity price is low for the Sichuan Network so that capital with interest of hydropower projects can not be repaid easily. Low profit from construction of hydropower station directly influences simple reproduction and expanded one of power enterprises. On the other hand, consumers waste electricity extravagantly, leading to shortage of power supply and limitation of development for national economy. It is necessary to raise electricity price. However, a reasonable price is very important for national economy, energy saving, power development and benefits of consumers. Therefore, it is essential for us to determine acceptable electricity price for consumers.

Key words electricity price, cost, prices

Influence of National Network Interconnection on the Southwest Network

Yang Nan

(Chengdu Coal Management Cadre Institute, Chengdu, 610072)

Abstract It is imperative to realize national network interconnection to form a good market for electricity. Based on analysis on significance, principle and mode of network interconnection, the role of the Southwest Network in the National Network, interconnection mode and plan for outgoing electricity are discussed.

Key words network interconnection, direct current transmission, electricity market, complementation of hydropower and thermal power

Probability Distributed Unknown Multipurpose Risk Decision

Fang Daonan Ye bingru

(Jiangsu Investment and Management Corporation, Nanjing, 210029)

Abstract In this paper, the study on the multipurpose risk decision, in which the unknown probability of the risk factors can't be described, is made. First, the causes of risk formation are analyzed and the uncertainty of the model structure is considered. Then the surrogate risk function (sensitivity index) is adopted to assess risk. Subsequent, the multipurpose risk decision maths model is set up and the solution for the model is presented. Finally, the model and the solution are used in computation in the second stage planning of Danjiangkou Reservoir. The computation results show that the model and the solution established by surrogate risk function are correct and reasonable.

Key words multipurpose, risk decision, surrogate risk function

A Preliminary Study on the Hydrologic Properties of Mountain Rivers

Wang Xiekang Yi Liqun Fang Duo Lin Shanyi

(Sichuan University, Chengdu, 610065)

Abstract Mountain rivers are characterized with distinct geographic features. And then, the nature of mountain rivers in the southwestern region is discussed. Based on measured data, preliminary study of its hydrological properties is introduced and provides a reliable basis to development of the southwestern mountain river resources.

Key words mountain river, hydrologic properties, flood hydrograph

Analysis and Study on Sediment Delivery Ratio

Wang Xiekang Ao Ruchuang Yu Guoliang Fang Duo

(Sichuan University, Chengdu, 610065)

Abstract Sediment delivery ratio has always not been defined accurately and distinctly. This paper has made further study on the concept and impact factors of sediment delivery ratio. By firstly introducing grain size and duration factors, making use of dimensional analysis, the formula for calculating sediment delivery ratio has been obtained in different areas. It concluded that sediment delivery ratio should theoretically be in inverse proportion to erosive area instead of the whole catchment area.

Key words sediment delivery ratio, dimensional analysis, erosion