

# 植物因子与明渠推移质输沙率的关系\*

拾 兵 曹叔尤 何建宇 毕慈芬  
(四川联合大学水电学院 成都 610065) (黄河上中游管理局 西安 710043)

李桂芬  
(中国水利水电科学研究院 北京 100044)

**提 要** 依据均匀流假设,采用理论分析与试验研究相结合的方法,借助床面相对剪切应力的推求,得到了沟道植树前后,推移质相对输沙率与植物因子  $F_v$  之间的关系.

**关键词** 明渠水流 植物 推移质输沙率

明渠中按一定规律种植植物后,人为地设置了一道道屏障,使得流经的水流阻力增大,水位攀升,床面切应力降低,推移质输沙率减小;从而导致了进出植物带影响区域的输出量不平衡,造成自壅水区上端开始的沿程淤积. 对于恒定水沙条件,给定了植物带长度和密度后,其拦截沙量是一定的,总量可由下式表示

$$W_s = \int_{t_1}^{t_2} [G_b - G_b(t)] dt \tag{1}$$

$$T_c = t_2 - t_1 \tag{2}$$

式中  $G_b$  为平衡输沙率,  $G_b(t)$  为  $t$  时刻的输沙率,  $T_c$  为自开始淤积至淤积达到平衡所需的时间.  $G_b$  可由国内外众多平衡输沙率公式计算求得,它仅与水沙条件有关;  $G_b(t)$  则是受植物作用后,植物带末端输沙率,它除与时间  $t$  有关外,还与植物有关参数和水流泥沙因子有关. 为了探讨植物对输沙率的影响,仅以  $G_b(t)$  作为研究对象,经引入一定假设后,并结合部分试验成果,分析某时刻  $G_b(t)$  与对应树木参数之间的内在联系(以下简称  $G_b$ ).

## 1 床面相对切应力与树木因子关系的建立

假设树木在明渠中按一定规律种植后,在足够长的树木林带内,水流能够形成均匀流(或接近均匀的渐变流). 令林带长为  $L$ ,  $I$  排树木阻水有效面积为  $A$ , 床面上树木占据面积为  $W$ , 淹没在水体中的树木总体积为  $V_f$ , 断面总面积及湿周分别为  $A'$

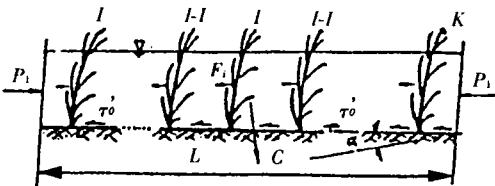


图 1 水体受力分析  
Fig. 1 Force balance analysis

\* 国家自然科学基金资助项目(编号 59679010)及水利部“九五”攻关课题(项目编号 95-4-1-4).

收稿日期:1997-06-06, 改回日期:1997-12-18.

和  $P'$  (含树木), 平均流速为  $v'$ , 则由受力平衡(见图 1)

$$\tau_0' \left( P' L - \sum_{i=1}^N W_i \right) + \sum_{i=1}^N \frac{\rho v'^2}{2} C_{D_i} A_i = \gamma (A' L - V_f) S_0 \tag{3a}$$

令  $\eta_b = \sum_{i=1}^N W_i / P' L$ ,  $\eta_i = A_i / A'$ ,  $f_v = V_f / A' L$ , 则

$$\tau_0' (1 - \eta_b) P' L + \frac{\rho v'^2}{2} A' \sum_{i=1}^N C_{D_i} \eta_i = (1 - f_v) \gamma A' L S_0 \tag{3b}$$

方程两端同除以  $P' L$ , 并代入  $R' = A' / P'$ , 则

$$\tau_0' = \frac{1}{1 - \eta_b} \left[ (1 - f_v) \gamma R' S_0 - \frac{\rho v'^2}{2} \frac{R'}{L} \sum_{i=1}^N C_{D_i} \eta_i \right] \tag{3c}$$

式中  $C_{D_i}$  为  $i$  行的平均阻力系数, 它与树木的布置方式及水流雷诺数有关. 据 S. W. Shen 的研究<sup>[1]</sup>, 无论是平行种植还是交错种植, 1~4 排阻力系数  $C_D$  值衰减较快; 4~ $N$  排 ( $N > 4$ ),  $C_D$  值基本保持某一常数. 为了分析方便, 忽略入口段  $C_{D_i}$  的波动值, 假定  $C_{D_i}$  为常数, 即  $C_{D_i} = C_D$ , 则有

$$\tau_0' = \frac{1}{1 - \eta_b} \left[ (1 - f_v) \gamma R' S_0 - \frac{\gamma C_D v'^2}{2g} \frac{R'}{L} \sum_{i=1}^N \eta_i \right] \tag{3d}$$

令  $\frac{C_D v'^2}{2g} = H_d$ ,  $\frac{R'}{L} \sum_{i=1}^N \eta_i = F_v$ , 则

$$\tau_0' = \frac{1}{1 - \eta_b} \left[ (1 - f_v) \gamma R' S_0 - \gamma H_d F_v \right] \tag{3e}$$

当明渠中无树木时, 床底切应力为

$$\tau_0 = \gamma R S_0 \tag{4}$$

将式(3e)除以式(4), 得

$$\begin{aligned} \frac{\tau_0'}{\tau_0} &= \frac{1}{1 - \eta_b} \left[ (1 - f_v) \frac{R'}{R} - \frac{1}{S_0} \frac{H_d}{R} F_v \right] \\ &= 1 - \frac{1}{1 - \eta_b} \left[ (f_v - \eta_b) - (1 - f_v) \frac{R' - R}{R} + \frac{H_d}{R} \frac{F_v}{S_0} \right] \end{aligned} \tag{5}$$

为了说明(5)式中  $(f_v - \eta_b)$ 、 $(1 - f_v) \frac{R' - R}{R}$ 、 $\frac{H_d}{R} \frac{F_v}{S_0}$  的量级大小, 表 1 列出了部分试验的计算

表 1  $\tau_0'/\tau_0$  有关因子对照表  
Table 1 Comparison  $\tau_0'/\tau_0$  with other factors related

| 树木种类 | $R' - R(M)$ | $S_0/\%$ | $f_v$   | $F_v$  | $\eta_b$ | $f_v - \eta_b$ | $(1 - f_v) \frac{R' - R}{R}$ | $\frac{H_d}{S_0 R} F_v$ |
|------|-------------|----------|---------|--------|----------|----------------|------------------------------|-------------------------|
| 乔 木  | 0.2000      | 2        | 0.00393 | 0.0302 | 0.003930 | 0              | 0.686                        | 2.402                   |
|      | 0.1190      | 2        | 0.00196 | 0.0153 | 0.001960 | 0              | 0.409                        | 1.800                   |
|      | 0.0600      | 2        | 0.00982 | 0.0077 | 0.009820 | 0              | 0.205                        | 0.331                   |
| 灌 木  | 0.0240      | 2        | 0.00077 | 0.0350 | 0.000875 | -0.00021       | 0.500                        | 3.780                   |
|      | 0.0667      | 2        | 0.00231 | 0.0940 | 0.002900 | -0.00059       | 0.024                        | 12.40                   |

结果,从表中可见,  $(F_V - \eta_0)$  为小量,  $(1 - f_V) \frac{R' - R}{R} < \frac{H_4}{R} \frac{F_V}{S_0}$ , 当  $F_V$  值较小时,  $(1 - f_V) \frac{R' - R}{R}$  与  $\frac{H_4}{R} \frac{F_V}{S_0}$  较接近. 反之  $\frac{H_4}{R} \frac{F_V}{S_0}$  值较大. 为简化计算, 令

$$\tau'_0/\tau_0 = 1 - F_V^m \tag{6}$$

式中  $m$  为指数, 并与  $f_V$  有关.

图 2 点绘了笔者和 S. W. Shen 的试验资料, 从中可以看出,  $\tau'_0/\tau_0$  随  $F_V$  的增大而减小, 其线型为曲线. 为了确定  $m$  的值, 表 2 列出了  $\tau'_0/\tau_0$ 、 $1 - \tau'_0/\tau_0$ 、 $F_V$ 、 $f_V$  与  $m$  的对应关系.

表 2  $m$  值相关表  
Table 2  $m$  of different plant types

| 植物类型 | 布置方式 | $\tau'_0/\tau_0$ | $1 - \tau'_0/\tau_0$ | $F_V$  | $f_V$    | $m$   | 备 注  |
|------|------|------------------|----------------------|--------|----------|-------|--|
| 乔 木  | 交 错  | 0.286            | 0.714                | 0.0302 | 0.003928 | 0.096 | $Q = 4.786\text{m}^2/\text{s}$<br>$S_0 = 2\text{‰}$<br>矩形断面<br>(S. W. Shen 资料) |
|      |      | 0.442            | 0.558                | 0.0153 | 0.001964 | 0.140 |  |
|      |      | 0.629            | 0.371                | 0.0077 | 0.009820 | 0.204 |  |
|      |      | 0.308            | 0.692                | 0.0272 | 0.003630 | 0.102 |  |
|      |      | 0.265            | 0.735                | 0.0258 | 0.003626 | 0.084 |  |
|      |      | 0.268            | 0.732                | 0.0273 | 0.003626 | 0.093 |  |
|      |      | 0.283            | 0.717                | 0.0274 | 0.003626 | 0.087 |  |
| 乔 木  | 平 行  | 0.188            | 0.812                | 0.0594 | 0.007860 | 0.074 | $Q = 5.89\text{m}^2/\text{s}$<br>$S_0 = 2\text{‰}$<br>矩形断面<br>(S. W. Shen 资料)  |
|      |      | 0.331            | 0.669                | 0.0303 | 0.003928 | 0.115 |  |
|      |      | 0.305            | 0.694                | 0.0303 | 0.003928 | 0.104 |  |
|      |      | 0.301            | 0.699                | 0.0302 | 0.003928 | 0.102 |  |
|      |      | 0.335            | 0.665                | 0.0302 | 0.003928 | 0.117 |  |
|      |      | 0.228            | 0.772                | 0.0435 | 0.005892 | 0.083 |  |
| 灌 木  | 交 错  | 0.777            | 0.223                | 0.0307 | 0.007670 | 0.431 | $Q = 6.82\text{m}^2/\text{s}$<br>$S_0 = 2\text{‰}$<br>梯形断面<br>(笔者资料)           |
|      |      | 0.735            | 0.265                | 0.0350 | 0.007670 | 0.396 |  |
|      |      | 0.452            | 0.548                | 0.0940 | 0.002310 | 0.254 |  |
|      |      | 0.448            | 0.552                | 0.0760 | 0.002310 | 0.230 |  |
|      |      | 0.394            | 0.626                | 0.0870 | 0.002310 | 0.205 |  |

绘  $f_V \sim m$  关系点, 如图 3 所示. 由相关分析, 则有

乔木交错布置  $m = 2 \times 10^{-3} f_V^{2/3}$  (7)

乔木平行布置  $m = 3.4 \times 10^{-3} f_V^{2/3}$  (8)

灌木交错布置  $m = 4 \times 10^{-3} f_V^{2/3}$  (9)

即  $m = k f_V^{-2/3}$   
 $\tau'_0/\tau_0 = 1 - F_V^{1/3} f_V^{-2/3}$  (10)

式中  $k$  为常数.

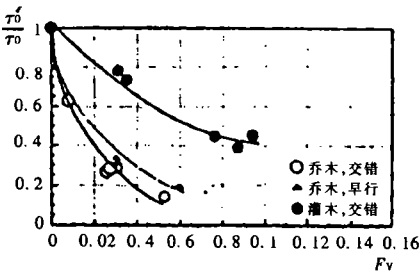


图 2  $\tau'_0/\tau_0 \sim F_V$  关系曲线

Fig. 2  $\tau'_0/\tau_0$  against  $F_V$

2 相对输沙率与树木因子关系的建立

由 Shields 输沙率方程<sup>[2]</sup>

$$G_b = \frac{10(\tau_0 - \tau_c)QS_0\gamma}{(\gamma_s - \gamma)d_{65}} \tag{11}$$

则植树后断面输沙率可表示为

$$G'_b = \frac{10(\tau'_0 - \tau_c)QS_0\gamma}{(\gamma_s - \gamma)d_{65}} \tag{12}$$

式中  $Q$  为水流流量,  $\tau_c$  为临界切应力,  $d_{65}$  代表粒径. 由式(10)、式(12)有

$$G'_b = \frac{10(\tau_0 - \tau_c)QS_0\gamma}{(\gamma_s - \gamma)d_{65}} - \frac{10\tau_0 F_v^{f_v}{}^{-2/3} QS_0\gamma}{(\gamma_s - \gamma)d_{65}} = G_b - \Delta G_b \tag{13}$$

其中,  $\Delta G_b = \frac{10\tau_0 F_v^{f_v}{}^{-2/3} QS_0\gamma}{(\gamma_s - \gamma)d_{65}}$  为输沙率减小量. (13)式除以(11)式

$$\frac{G'_b}{G_b} = 1 - \frac{\tau_0}{\tau_0 - \tau_c} F_v^{f_v}{}^{-2/3} \tag{14}$$

此式即为  $F_v$ 、 $f_v$  对应的泥沙输沙率的相对关系.

3 对式(14)的讨论和验证

$$F_v = \frac{R'}{L} \sum_{i=1}^N \eta_i = \frac{1}{LA'} [R' \sum_{i=1}^N A_i]$$

上式中分母为植物带总体积, 分子为树木总阻水面积与水力半径的乘积, 是具有体积的量纲, 因此  $F_v$  为体积含量, 由于  $F_v$  与水力半径  $R'$  有关, 为区别  $f_v$  值, 在此称之为水力体积含量, 所以  $G'_b/G_b$  是  $F_v$ 、 $f_v$  的函数. 随着床面的淤积抬升, 水力半径  $R'$  减小,  $F_v$ 、 $f_v$  也随着减小,  $G'_b/G_b$  值则增大, 影响区域内的泥沙淤积速率则减缓. 当植物全部被泥沙埋没时,  $F_v$ 、 $f_v$  为零,  $G'_b/G_b = 1.0$ , 即断面输沙率已恢复到河床调整后的无树状态; 但当树木很高, 如乔木, 水流和泥沙无法淹没时, 则随着  $R'$  值的减小, 流速增加, 同时水面比降也将增加, 此时植物带范围内的水流已为非均匀流, 水面线型为落水曲线, 此时式(14)已不适用. 因此式(14)只反映了上游淤积体推进到植物带附近, 床面均匀淤积抬升, 林带内保持为均匀流情况; 而当水流出现非均匀流时,  $G'_b/G_b$  之表示关系, 还应引入其它因子, 方能揭示其变化规律.

为了检验式(14)的可靠性, 用图 4 对笔者

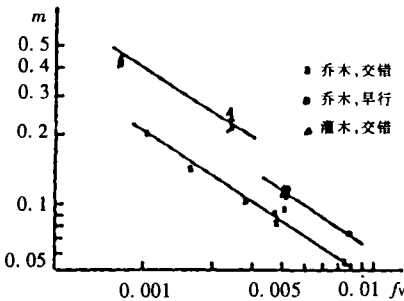


图 3  $m \sim f_v$  关系曲线  
Fig. 3  $m$  against  $f_v$

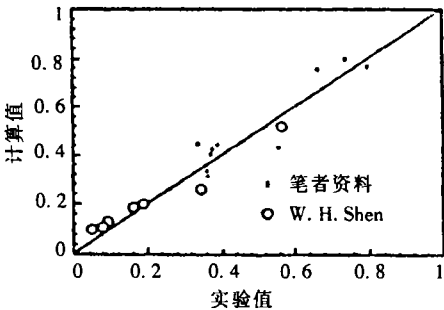


图 4  $Q'_b/Q_b$  计算值与实测值对比  
Fig. 4 Comparison calculating  $Q'_b/Q_b$  with its experimental data

和 S. W. Shen 的部分实测资料进行了验证. 由图 4 可见, 式(14)的计算值与实测值吻合较好.

## 4 结 语

依据均匀流假设, 采用理论分析与试验研究相结合的方法, 得到了  $G_b/G_b$  与植物水力体积含量  $F_v$  和树木体积含量  $f_v$  之间的关系. 由此可推求植物带布设后, 推移质输沙率的减小值  $\Delta G_b$  及植物带前推移质淤积量.

## 参 考 文 献

- [1] Ruh-Ming Li and Hsieh W. Shen. Effect of Tall Vegetations on Flow and Sediment. Journal of Hydraulics Division. , May 1973, Vol. 99, pp. 799~801.
- [2] Henderson, I. M. , Open Channel Flow, The Macmillan CO. , New York, N. Y. 1966, pp. 438.

**第一作者简介** 拾 兵, 男, 37 岁, 副教授, 四川联合大学高速水力学国家重点实验室 95 级博士生. 主要从事水力学及河流动力学方面的研究及教学工作.

# A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATING FACTORS AND BED LOAD TRANSPORTATION IN AN OPEN CHANNEL

Shi Bing Cao Shuyou He Jianyu

(Hydraulic and Electronic Engineering College, Sichuan Union University Chengdu 610065)

Bi Cifen

(Administrative Bureau of Up and Middle Reaches of Yellow River Xian 710043)

Li Guifen

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research Beijing 100044)

## Abstract

According to assumption of uniform flow, by using theoretical analyses and experimental research and based on the solving method of dimensionless shear stress, authors obtain the relationship between relative bed load transport rate and plant factor before and after planting vegetation in open channels.

**Key words** open channel flow, plant factor, transport rate of bed load