

文章编号: 0559-9350 (2003) 07-0046-06

非均质泥流的输移特性

舒安平¹, 费祥俊², 刘青泉³

(1. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100044; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100084)

摘要: 非均质泥流是一种含有大量悬浮细颗粒的高浓度固液两相流体, 也是泥石流的一种特例。作者依据水槽输沙试验资料建立的泥流不淤流速公式, 通过实测资料检验了其可靠性。在此基础上考虑推移部分影响, 推导出非均质泥流的不淤流速、临界坡降、沟道断面形态指标等重要的输移临界参数计算公式。最后列举计算实例, 提出应用计算方法, 并据此进一步揭示了非均质泥流的输移特性。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 非均质泥流; 输移特性; 不淤流速; 临界坡降

中图分类号: TV144

文献标识码: A

在我国西北黄土丘陵沟壑区, 由于地形陡峻、土壤结构散松, 往往在降雨后容易形成容重高达 $1.5 \sim 1.7 \text{t/m}^3$ 以上的非均质泥流。泥流具有组成颗粒细、悬移成分多、容重高等特点, 一旦成灾, 不仅对所在沟道周边造成严重危害, 如冲毁路桥、中断交通、淹埋村舍农田等, 而且由于沟床冲刷下切和溯源向上侵蚀, 造成黄土丘陵沟壑区地貌千沟万壑极为破碎, 水土流失十分严重。1978年7月12日发生在甘肃天水县菜子沟的泥流即为一个典型的例证^[1]。当时泥流容重高达 1.9t/m^3 , 总量多达 18万 m^3 , 其中 10万 m^3 停积了沟道下段, 8万 m^3 停积在沟口铁路附近, 淤厚高达 $5 \sim 6 \text{m}$, 漫溢宽度达 100m , 不仅在当时造成了十分严重的水土流失和经济损失, 而且在泥流发生后第4天, 源头沟谷发生一次土方量为 $5 \sim 6 \text{万 m}^3$ 的坍塌, 坍塌体冲出挤压停积在沟底尚未固结的泥流堆积体, 又一次造成大规模的次生泥流灾害。泥流进入下游河道后, 由于坡降变缓, 粗颗粒分选沉降, 可能进一步演变成以细颗粒为主的高含沙水流, 致使河道淤积甚至堵塞, 对河道行洪能力和两岸居民经济生活造成严重影响。因此, 治理泥流灾害已为工程实践所急需。但治理的关键在于, 正确地认识非均质泥流的输移特性, 并确定其相关重要参数, 如不淤流速、临界坡降、断面形态参数等, 并以此为依据制定合理有效的防治规划和措施。鉴于问题本身的复杂性以及目前有关研究成果的缺乏, 本文以前人成果为基础, 试图通过试验资料分析、理论推导及应用计算相结合的方法, 对描述非均质泥流输移运动的不淤流速、临界坡降及沟道形态等重要的特征参数进行系统分析研究, 所取得成果不仅有利于完善河流动力学学科内容, 而且对治理黄土丘陵沟壑区泥流灾害、小流域水土流失及治理黄河泥沙问题均具有重要的实际意义。

1 非均质泥流运动的基本特点

1.1 基本特征 泥流以细颗粒组成为主, 主要悬移形式运动, 其中细颗粒与水体一起构成了稳定的浆体, 与水流同步运动。因此所谓泥流运动速度主要是指细颗粒与水体组成的悬液的运动速度。另一

收稿日期: 2002-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49831010)

作者简介: 舒安平 (1965-), 男, 湖北鄂州人, 高级工程师, 博士, 主要从事河流动力学, 滑坡泥石流及水土保持。

方面，泥流由于颗粒组成细，在高浓度输移时粘度高，容易进入层流流态。但在浓度不是很高而流量较大的沟道中，则往往呈紊流流态。泥流在不同流态下具有完全不同的阻力规律，对于层流流态只要克服阻力即可运动；对于紊流流态必须要有一定的流速来支持颗粒的悬移运动，因而其阻力与运动速度有关，这与层流的阻力特性明显不同。

泥流与高含沙水流不同之处主要表现在物质来源、浓度大小、水力坡降及输沙特性等四个方面。泥流的固体物质主要来自于沟谷上段的滑坡、崩塌等的重力侵蚀和沟床冲刷的水力侵蚀，其中细颗粒所占比例很大，而自然界中的高含沙水流往往是沟道泥流汇集到河道后才形成的，也就是说泥流是高含沙水流中泥沙成分主要来源之一。由于泥流的物质组成细，土体极限浓度偏小，因而其容重一般在 $\gamma_m = 1.45 \sim 1.85 \text{ t/m}^3$ 或相当于体积比浓度 $S_v = 0.3 \sim 0.5$ ，明显大于一般意义下的高含沙水流的浓度。另一方面，泥流的形成区及流通区沟道比降一般分布在 $2\% \sim 10\%$ 之间，但也有少数泥流形成在坡比为 $50\% \sim 100\%$ 的陡坡坡面上，大多陡于河道形成高含沙水流的水力坡降。在输沙特性方面，由于受到沟道强烈的侵蚀作用，固体物质沿程加入，使得泥流流量和含沙量沿程增加，并在沟口达到最大，此时泥流容重可高达 $\gamma_m = 1.5 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ 以上，输沙能力只取决于固体物质的补给条件，而与流量无关，这与高含沙水流输沙能力只取决于水流挟沙力（水流泥沙与边界条件的综合因子）的事实形成鲜明对照。

1.2 悬移运动特点 对于处在紊流状态的非均质泥流，大部分细颗粒主要由水流紊动支持其悬移运动。因此，保持其固体颗粒不淤的最低临界流速是描述泥流输移运动最核心的参数之一。尽管目前一些文献中提出一些不淤流速的经验性公式^[2]，但这些公式因受地区局限性很大而不宜推广应用。因而有必要进行深入分析研究。

在平衡输沙的条件下，颗粒在液体中的重力下沉作用恰好与液体向上的紊动作用相平衡。根据扩散理论，选择描述固体颗粒的重力下沉与紊动扩散作用对比参数，或者反映垂向浓度分布均匀程度的泥沙悬浮指标 Z 进行分析，悬浮指标 Z 表达式为：

$$Z = \frac{u_*}{u_*} \quad (1)$$

式中： u_* 为颗粒沉速； K 为卡门常数； u_* 为摩阻流速。

一般来说， Z 值愈小，垂向浓度分布愈均匀； Z 值愈大，则愈不均匀；当 Z 值接近 5 时，几乎所有固体颗粒集中于床面底层作推移运动。

泥流作为具有大量细颗粒悬移运动的一种，在不同条件下悬移运动开始向推移运动转变时 Z 或 u_* / u_* 的临界值，即 $(u_* / u_*)_c$ ，而泥流的非均质性正是从颗粒上限粒径 (d_{90}) 开始出现推移时以 $(u_* / u_*)_c$ 值为判别指标的临界不淤条件和床面附近存在推移运动这两个方面得到体现的，因此选取 $(u_* / u_*)_c$ 为临界指标进行分析，对于研究非均质泥流的输移特性具有重要意义。

2 非均质泥流输移的临界参数

2.1 不淤流速 平衡输沙试验是在室内长 16m、宽 0.5m、高 0.5m、底坡可调的玻璃水槽中进行的^[3]，试验采用 $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$ 的天然沙，含沙量为 $S = 40 \sim 760 \text{ kg/m}^3$ ，非均匀沙的上限粒径 $d_{90} = 0.08 \sim 0.12 \text{ mm}$ 。通过对水槽试验实测资料进行统计分析发现，在不同水沙条件下处在上限粒径 d_{90} 的悬沙颗粒开始出现推移时 $(u_* / u_*)_c$ 与 $S_v (4R/d_{90})^{1/6}$ 的关系最为密切。通过数值拟合，并经整理和化简最后得到泥流的不淤流速公式^[4,5]

$$U_c = 27.8 \sqrt{\frac{8}{f}} \cdot S_v^{2/3} \cdot \left(\frac{4R}{d_{90}} \right)^{1/9} \quad (2)$$

为了检验式 (2) 的可靠性，我们应用其他水槽输沙试验资料及部分高浓度渠道实测资料进行验证，结果表明采用式 (2) 计算的不淤流速与实测值吻合的程度令人满意，如图 1 所示，因此式 (2)

可以用于计算一般非均质泥流的不淤流速。

实际上，自然界中产生的泥流本身存在着部分粗颗粒成分，尽管所占比例不大，但对水流运动及能耗却影响很大，详见后文。对于存在粗颗粒推移运动的非均质泥流，其不淤流速显然不能简单地采用式 (2) 进行计算。假设推移运动的粗颗粒所占重量比为 x ，则由泥流颗粒级配曲线可以确定粗、细颗粒的分界粒径 d_0 ，那么相应的悬移部分的固体浓度 S_{yf} 应为：

$$S_{yf} = \frac{S_v(1-x)}{1-xS_v} \quad (3)$$

将 S_{yf} 替代式 (2) 中含沙浓度 S_v ，即可得出存在推移运动的非均质泥流的不淤流速公式

$$U_c = 27.8 \sqrt{\frac{8}{f}} \cdot \rho_0 \cdot S_{yf}^{2/3} \left(\frac{4R}{d_0} \right)^{1/9} \quad (4)$$

以紊流过渡区为代表，其阻力系数 f 可表达为^[6]：

$$f = 0.11 \left(\frac{d_0}{4R} + \frac{68}{Re_m} \right)^{0.25} \quad (5)$$

式中： Re_m 为浑水雷诺数

$$Re_m = \frac{4RU_c \cdot m}{g} \quad (6)$$

以及系数

$$= 1 - 0.4 \lg(\mu_r) + 0.08 (\lg \mu_r)^2 \left(\frac{4R}{d_0} \right)^{1/6} \quad (7)$$

式中： μ_r 为泥流的相对粘度（相对于清水）， $m = \mu_r \cdot \mu_0$ （ μ_0 为清水粘滞系数）。

由于阻力系数 f 值中也包含有未知的流速因子 U_c ，所以应用时需要将式 (4) 和式 (5) 进行迭代试算。实际上 U_c 对 f 值的影响并不大，其试算很快即可完成。

2.2 临界坡降 与清水水流不同，非均质泥流的运动除了需要克服边界阻力外，还需克服内部悬液的粘性阻力，对此已反映在式 (5) 中第二项的雷诺数即粘性阻力上。此外，由于泥流中有少部分粗颗粒作推移运动，因而床面的摩擦阻力是必须加以考虑，因此非均质泥流的临界坡降即为悬移与推移两部分之和，即：

$$J = J_e + J_s \quad (8)$$

式中： J_e 为悬移部分阻力坡降，可表示为：

$$J_e = \frac{f}{8} \cdot \frac{U_c^2}{gR} \quad (9)$$

将式 (4) 代入式 (9) 可得悬移部分坡降为：

$$J_e = \frac{1}{gR} \left[27.8 \cdot \rho_0 S_{yf}^{2/3} \left(\frac{4R}{d_0} \right)^{1/9} \right]^2 \quad (10)$$

至于推移部分坡降 J_s ，则与推移颗粒所占重量比 x 有关，即：

$$J_s = xS_v \left(\frac{s - \rho_0}{m} \right) \tan \phi \quad (11)$$

式中： ρ_0 为悬液容重，即 $\rho_0 = \rho_s + S_v(\rho_s - \rho_0)$ ； $\tan \phi$ 为固体颗粒与床面接触的摩擦系数，拜格诺取值为 $\tan \phi = 0.63$ 。

2.3 泥流沟道断面的形态参数 在输沙平衡的条件下，非均质泥流上限粒径对应的不淤流速可采用式 (4) 计算确定。但由式 (4) 可看出，非均质泥流的不淤流速不仅与悬沙上限粒径及泥流浓度等因

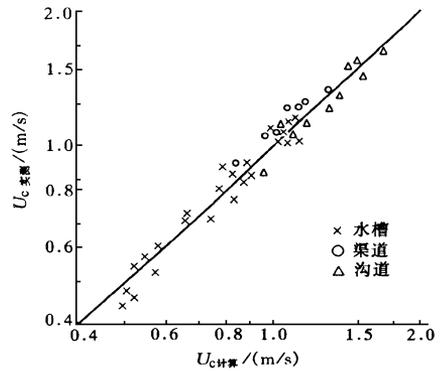


图1 泥流不淤流速的验证结果

素有关，而且还与沟道断面的水力半径 R 有关，而后者还与泥流流量和沟道断面形态有关。因此在已知流量的前提下，尚需建立另一个方程与式 (4) 一起联解，才能求得非均质泥流运动速度与沟道水力半径两个变量，该方程即为考虑断面形态的流量连续方程。

如令断面形态参数 M 为断面湿周 p 与水力半径 R 之比，即：

$$M = p/R = A/R^2 \quad (12)$$

于是流量连续方程可表达为：

$$Q = A \cdot U_c = MR^2 \cdot U_c$$

即：

$$Q/M = R^2 \cdot U_c \quad (13)$$

断面形态参数 M 往往随流量大小而有一定的变化，一般可表述为：

$$Q = a \left(\frac{Q}{M} \right)^b \quad (14)$$

式中： a 、 b 值可由实测资料求得，与沟道的冲淤变化有关。

3 应用计算

3.1 泥流的不淤流速 为便于应用，现列举容重 $\gamma_m = 1.60\text{t/m}^3$ 的非均质泥流进行计算说明。

假定该泥流的粗颗粒推移部分所占重量比为 $x = 0.15$ ，其断面关系式为：

$$Q = 40 \left(\frac{Q}{M} \right)^{0.75} \quad (15)$$

根据粗颗粒重量比 $x = 0.15$ ，由相应的泥流颗粒级配曲线图查得悬沙最大粒径（粗、细颗粒分界粒径） $d_0 = 0.35\text{mm}$ ，并按式 (3) 计算悬移部分的体积浓度 $S_{vf} = 0.32$ ，以及相应的悬液相对粘度 $\tau = 9.30$ 和 d_0 悬沙的沉速 $v_0 = 0.82\text{cm/s}$ 。

首先将水力半径取值为 $R = 0.5、1.0、1.5、2.0\text{m}$ ，依次列表计算 U_c 及 $R^2 U_c (= Q/M)$ ，并绘制出 $R \sim U_c$ 及 $R \sim Q/M$ 关系线，分别如表 1 和图 2 所示。然后，利用图 2 所示的关系线，即可求得不同流量下的泥流流速 U_c 及水力半径 R 。

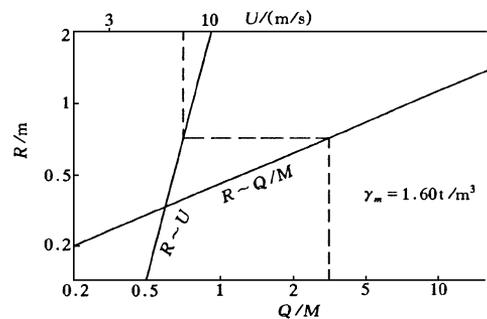


图 2 $R \sim U_c$ 及 $R \sim Q/M$ 关系线

表 1 泥流的不淤流速与断面形态参数 ($\gamma_m = 1.60\text{t/m}^3$)

R/m	0.5	1.0	1.5	2.0	备注
$U_c/(\text{m/s})$	7.35	8.64	9.46	10.2	式 (4)
Q/M	1.84	8.64	21.3	40.8	式 (13)

例如 $Q = 100\text{m}^3/\text{s}$ ，由式 (13) 得 $Q/M = 3.39$ ，再由 $R \sim Q/M$ 关系求得水力半径 $R = 0.64\text{m}$ ，由 $R \sim U_c$ 关系求得不淤流速 $U_c = 7.8\text{m/s}$ ；如此类推，可求得 $Q = 50\text{m}^3/\text{s}$ 时水力半径 $R = 0.43\text{m}$ ，不淤流速 $U_c = 7.0\text{m/s}$ 。从表 1 和图 2 可以看出，在相同容重下，尽管泥流流量变幅很大，但所要求的泥流的不淤流速变幅却比较小。

3.2 泥流的临界坡降 根据上例计算结果，进一步计算不同流量 $Q = 10、50、100、150\text{m}^3/\text{s}$ 条件下的临界坡降，其结果如表 2 所示。

上述计算结果表明，泥流输移的临界坡降因流量增大而减小，但减小的幅度比流量增加的幅度要小。另一方面，在黄土丘陵沟壑区易发生泥流的沟道中，其坡降较陡，往往超过一般小流域。如按上表计算，对于一般流量如 $Q = 10\text{m}^3/\text{s}$ ，泥流运动需要的临界坡降也只不过 0.06 左右，小于一般泥流沟的沟床纵坡，表明泥流一旦形成，将会在黄土丘陵沟壑区沟道里维持相当长距离的输移运动。因此，

抑制沟床水力侵蚀，主要靠谷坊工程措施来提高侵蚀基面、稳定沟谷沿岸和减缓沟道坡度。

表 2 不同流量下泥流临界坡降 ($m = 1.60t/m^3$)

$Q/ (m^3/s)$	10	50	100	150	备注
Q/M	0.16	1.35	3.39	11.51	式 (13)
R/ m	0.16	0.43	0.64	1.12	图 2
J_e	0.0384	0.0178	0.131	0.0085	式 (10)
J_s	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	式 (11)
J	0.0622	0.0416	0.0343	0.0323	式 (8)

3.3 泥流的输沙特性 已知泥流上限粒径 $d_{90} = k_s = 0.10mm$ ， $R = 1.0m$ ，首先计算不同浓度下的相对粘滞系数（相对于清水值）、相应的沉速 v_{90} ，然后按式 (4) 计算不同浓度下的不淤流速 U_c ，其结果如表 3 所示，并绘制泥流的不淤流速 U_c 随着浓度 S_v 的变化图，如图 3 所示。

表 3 泥流的输沙浓度与不淤流速的关系

S_v	0.0377	0.0755	0.113	0.151	0.189	0.226	备注
μ	1.40	1.91	2.50	3.40	4.45	6.15	$k_s = 1mm$
$v_{90}/ (cm/s)$	0.60	0.44	0.32	0.23	0.17	0.12	$R = 1.0m$
$U_c/ (cm/s)$	179	222	197	168	139	106	$d_{90} = 0.10mm$

由图 3 可看出，对于非均质泥流，当浓度 S_v 较低时，浓度提高使得不淤流速增加， v_{90} 随浓度增加而减小不大，在悬液浓度提高到一定程度以后， S_v 增加使不淤流速增大的程度已不足以抵消因 v_{90} 的急剧下降而使得不淤流速的减小幅度，以致于浓度越高，不淤流速呈减少趋势，这种变化规律不仅被许多室内管道及明槽的试验所证实，而且从输沙浓度的角度进一步论证维持泥流运动并非需要很大的沟道或坡面坡降这一事实。

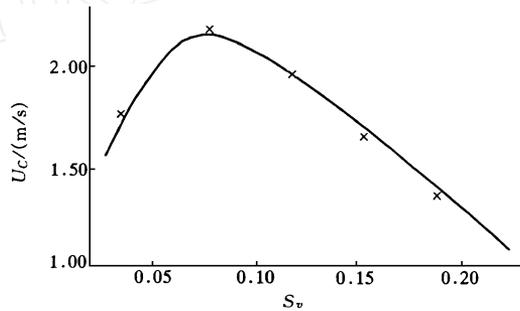


图 3 $U_c \sim S_v$ 关系

4 结 语

归纳全文，可得出如下几点认识：(1) 高容重的泥流流过沟道下段乃至沟口，由于坡度减缓或迅速展平，低于输沙要求的临界坡降，泥流将发生淤积，甚至于淤埋沟口附近的村舍及各种设施，造成泥流灾害。(2) 即使在流量不大的情况下，黄土丘陵沟壑区也可以产生泥流，使得早期堆积在沟谷的黄土发生塌滑、沟床受到强烈冲刷，并促使泥沙不断加入到泥流行列，泥流流量沿程加大，进一步加大了冲刷强度，以致泥流输沙浓度迅速提高，从而加剧黄土丘陵沟壑区水土流失。(3) 非均质泥流的不淤流速及临界坡降分别可用式 (4) 和式 (8) 来表达，断面形态参数则可由式 (13) 确定，它们构成描述泥流输移运动的核心公式，将为治理泥流灾害提供理论依据。(4) 由于维持泥流运动并不需要太陡沟道坡降，因此兴建谷坊工程提高沟床侵蚀基面、稳定沟谷沿岸和减缓沟道坡度等均成为治理泥流灾害的有效措施。

参 考 文 献：

- [1] 中科院兰州冰川冻土研究所，甘肃交通科学研究所合著. 甘肃泥石流 [M]，北京：人民交通出版社，1980：75.
- [2] 中国水利学会泥沙专业委员会主编. 泥沙手册 [M]，北京：中国环境科学出版社，1992：566.

- [3] 舒安平. 高含沙水流挟沙能力及输沙机理的研究 [D]. 清华大学, 1994, 1.
[4] 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).
[5] 费祥俊, 舒安平. 多沙河水流输沙能力研究 [J], 水利学报, 1998, (11).
[6] 费祥俊. 伪均质紊流阻力的研究 [J], 水利学报, 1990, (12).

Characteristics of non-uniform muddy flow transportation

SHU An-ping¹, FEI Xiang-jun², LIU Qing-quan³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Mechanics Research, Chinese Academy of sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Non-uniform muddy flow may be defined as one kind of two-phase flow with large amount of fine particles and high concentration of sediment. According to the flume tests and basic theoretical analysis, several important formulas describing non-uniform muddy flow transportation, such as non-depositing velocity, critical gradient and ditch phase factors are deduced. On this basis, the formulas are applied to demonstrate the characteristics of non-uniform muddy flow transportation.

Key words: loess hilly ravine area; non-uniform muddy flow; transportation; non-depositing velocity; critical gradient

(上接第 45 页)

Experimental study on development of river pattern in the process of river reformation

CHEN Li¹, ZHANG Jun-yong¹, XIE Bao-ling¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The changing of flow condition caused by construction of hydro projects will result in river reformation and development of river pattern downstream of the reservoir. In this paper, the development of river pattern in the process of reformation is studied by means of flume experiment and the influences of river slope, angle between main flow and thalweg, discharge and grain size of river bed material are analyzed according to the experimental data and theory. It is found that the channel will be widened as the river slope or discharge increases and grain size decreases, if the angle between main flow and thalweg is zero. In case the angle is not zero, under certain conditions of grain size of bed material and discharge, a most suitable slope exists, for which the river will develop into a pattern of meandering.

Key words: reformation process; river pattern; alluvial process; datum plane of erosion