

# 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算\*

陈宁生 崔 鹏 刘中港 韦方强

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要** 泥石流的黏粒含量对泥石流容重( $\gamma_c$ )有很大的影响. 通过对我国西南地区 45 条典型的沟道泥石流容重与黏粒含量关系的统计分析, 基于黏粒含量, 使用多项式对泥石流容重进行计算, 取得良好的结果, 所建立的广义多项式模式和针对黏性泥石流的对数模式可应用于无法观测的泥石流沟的泥石流容重计算. 计算结果与实际观测分析的误差较小, 这说明该模式具有很强的针对性. 通过分析确定泥石流黏粒含量与容重的关系是黏粒含量影响泥石流的形成、运动和悬浮颗粒粒径的结果, 其机理清楚可靠. 通过泥石流黏粒含量与容重的关系趋势线分析发现黏粒含量很少(3%以下)时, 形成的泥石流通常为稀性泥石流, 泥石流体的容重随黏粒含量的减少而减小, 这种泥石流随着黏粒含量的降低向水石流或者夹沙水流的状态发展. 黏粒含量在 3%~18%之间时, 容易形成黏性泥石流, 黏粒含量在 5%~10%时泥石流的容重随黏粒含量的增加而增加, 黏粒含量在 10%~18%时泥石流的容重随黏粒含量的增加而减小. 黏粒含量超过 18%时, 容易形成泥流, 这时候形成的泥流的容重与低黏粒含量时形成的稀性泥石流随黏粒含量的变化趋势相反, 性质方面也有很大差别, 黏粒含量在 7%~11%之间时候形成的泥石流的容重平均值最大. 特别地, 对于黏性泥石流, 模拟出的对数容重计算公式, 适用于黏粒含量 3%~18%的泥石流体, 该方程容重计算值最大可达 2.32 ( $\text{t/m}^3$ ). 这与目前泥石流容重的最大观测值相符.

**关键词** 黏土颗粒 泥石流 容重

依据容重的不同可将泥石流划分为黏性泥石流、过渡性泥石流和稀性泥石流. 对这些不同类型的泥石流人们采取的防治措施大相径庭. 泥石流的容重是决定泥石流性质的重要参数, 也是泥石流防治工程设计的必要参数. 针对泥石流的容重, 人们采取了许多方法加以分析测试和计算. 对于可以观测的泥石流, 如云南

2003-08-26 收稿, 2003-12-30 收修改稿

\* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-306)和中国科学院西部之光项目(2002~2003)资助

的蒋家沟泥石流<sup>[1]</sup>和美国的圣海伦火山泥石流<sup>[2]</sup>, 人们可以直接取样分析, 依据实际泥石流取样的重量和体积的关系计算泥石流容重。然而, 可以观测到的泥石流沟是极少的, 相反绝大部分的泥石流是难以观测的。对这些无法观测的泥石流, 其容重的确定方法目前多采用泥石流留下的痕迹和泥石流见证者的描述来进一步分析。如有见证者, 可在现场利用泥石流堆积物重新配制泥石流, 依据现场泥石流观测者的描述确定泥石流的浓度, 并结合其他方法综合确定容重<sup>[3]</sup>。然而, 对于久远的泥石流, 由于人们无法追忆, 其特征难以确定, 故此方法的应用受到极大的限制。人们企图利用其他的方法加以分析计算。人们经过分析研究发现泥石流的颗分与容重关系密切, 于是出现了采用 $d_{50}$  (累积百分含量 50% 颗粒直径) 为主要参数的经验公式法<sup>[4]</sup>。

对于某一条泥石流沟通过统计分析, 该方法有一定的应用价值, 然而实际应用中, 由于同一 $d_{50}$ 的泥石流样, 其颗粒的级配差别极大, 容重的差别也较大; 而且该方法缺乏理论支持和大量样本统计的支持, 故难以进一步推广应用。实际的分析计算中, 也有采用泥石流运动的某些参数经验性地确定泥石流的容重的<sup>[4]</sup>, 由于这些参数的影响因素较多, 这些公式大都属经验性的, 这些经验公式也多只适用于某一条或几条沟。

对于大多数无法观测, 无目击者或目击者难以准确确定其特征的泥石流沟, 由于道路、水利等工程防治的需要, 人们渴望寻找更为实用和具有理论支持的科学方法来确定曾经暴发过的泥石流的容重。

经过多年的研究人们发现在世界范围内的泥石流体大部分含有一定量的小于 0.005 mm 的黏土颗粒, 不同容重的泥石流, 其黏粒含量有较大的差别。一般地, 高容重的黏性泥石流大多在 5% 左右<sup>[5]</sup> (我国定义的黏土颗粒为小于 0.005 mm, 欧美国定义的黏土颗粒为小于 0.002 mm); 而稀性泥石流含量较少。著名的委内瑞拉中部 1999 年 12 月 15~16 日爆发的黏性泥石流小于 0.005 mm 的细颗粒含量大约为 3%~5%<sup>[6]</sup>; 美国南加州森林火灾后 1997~1998 年爆发的 30 条黏性泥石流沟中, 小于 0.005 mm 的黏土含量大部分在 5% 左右<sup>[7]</sup>。美国著名的圣海伦火山黏性泥石流小于 0.005 mm 黏土颗粒含量一般大于 10%<sup>[2]</sup>。我国著名的云南蒋家沟泥石流的黏土颗粒的含量大都在 8%~10% 左右<sup>[1]</sup>。我国中尼公路沿线典型的 15 条泥石流沟泥石流源区和泥石流体黏粒的变化从 0.69%~17.2%, 黏土颗粒的平均含量为 3.5%, 黏性泥石流的黏粒含量较高, 大多大于 3%, 而稀性泥石流均小于 3%<sup>[1]</sup>。所以泥石流土体的黏粒含量是值得注意的一个参数。

通过研究人们发现泥石流需要一个最小的黏粒组分含量<sup>[8,9]</sup>, 低黏粒含量的

1) 陈 瑞, 陈宁生, 周 麟, 等. 中尼公路国境内(曲水大桥~友谊桥段)整治改建工程“工可”阶段代表性泥石流沟勘察报告. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 2001

泥石流流体必然限制了泥石流搬运粗大颗粒的能力<sup>[10]</sup>, 所以泥石流的黏粒含量的多少通过影响泥石流粗大颗粒的含量必然影响容重, 即泥石流的黏粒含量与泥石流的容重的关系是客观存在的.

基于以上的理论基础和实际的观测分析, 本文以基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算为题, 以我国西南地区交通要道或其他醒目区域, 人们对其特征十分清楚, 容重值相对可靠(蒋家沟除外)的 44 条泥石流沟的 49 个泥石流容重与黏粒含量的关系, 以及蒋家沟 1998, 2000, 2001 年 153 个实测的泥石流容重与黏粒含量的关系数值(合计 202 个数据)为基础, 统计分析容重与黏粒含量关系的数学模式, 结合通过误差分析, 说明模式应用的可行性. 通过理论的分析揭示二者关系的机理, 进一步为此计算方法建立理论基础.

## 1 黏粒含量与泥石流容重关系的理论分析

通过泥石流流体悬浮颗粒的机理, 黏土影响液化而影响泥石流固体物质的启动机理和泥石流的运动力学过程可以知道泥石流的黏粒含量与泥石流的容重具有一定的关系.

### 1.1 基于颗粒悬浮机理的分析

泥石流的容重与流体中能悬浮的颗粒的数量和大小有关, 流体中含有的颗粒越大, 颗粒的数量越多, 则流体的容重越大. 依据流体颗粒的重力和悬浮的最大颗粒的相关公式<sup>[5]</sup>, 对悬浮的球体颗粒, 其最大的悬浮颗粒粒径为

$$D_0 = \frac{60\tau_0}{(\rho_s - \rho_m)g} + \frac{60P_n}{\pi(\rho_s - \rho_m)g}, \quad (1)$$

式中,  $D_0$ 为泥石流悬浮最大颗粒的直径,  $\rho_s$ 为颗粒容重,  $\rho_m$ 为浆体容重,  $\tau_0$ 为泥浆的剪切强度,  $P_n$ 为浆体的承压强度. 一般地, 石块固体颗粒的容重变化较小, 都在  $2.65 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ . 由方程(1)可知在一定的范围内, 随着泥石流黏粒含量的增加, 浆体的容重 $\rho_m$ 增加, 剪切强度 $\tau_0$ 增加, 同时同一深度的浆体的承压强度 $P_n$ 增加, 结果泥石流流体悬浮最大颗粒的直径 $D_0$ 也增大, 促使泥石流容重增加.

### 1.2 基于泥石流液化产流机理的分析

泥石流的容重取决于其中的土水比, 土水比的值越大泥石流的容重越大, 见(2)和(3)式.

$$\gamma_C = \gamma_s \times (1 - C_v) + \gamma_w \times C_v, \quad (2)$$

$$\gamma_C = \gamma_s - C_v \times (\gamma_s - \gamma_w), \quad (3)$$

其中, 泥石流流体中固体颗粒的平均比重为 $\gamma_s$ , 水的容重为 $\gamma_w$ , 泥石流体的容重为

$\gamma_C$  水的体积比重为  $C_v$ 。可见水的体积比重与泥石流体的容重成一次线性负相关关系。

目前的研究表明泥石流源区土体的内部孔压增加, 土体的液化是土源增加, 土水比增大的条件。土体黏粒可以通过影响土体的结构和孔隙的连通性, 影响孔压的上升并影响土体的强度。泥石流这种宽级配土体具有特殊的结构。其中的网格结构对黏粒等细颗粒的束缚能力增强, 网格结构可以束缚细颗粒形成网粒结构, 网粒结构镶入较大石块形成泥石流体的格架结构<sup>[11]</sup>。从震动液化的基本理论出发<sup>[12-14]</sup>在一定震动外源条件下, 黏粒在含水量增加的过程中, 泥石流源区砾石土中一定的黏粒含量的吸水膨胀会堵塞土体气体的通道使土体的孔压来不及消散而升高, 从而降低土体的强度, 有时实现液化, 土体完全由孔压支撑, 土体的强度为零或接近零。液化的土体迅速产流, 使泥石流的土源增加, 土水比增加而增加容重。当源区土体的黏粒含量太高时(不是宽级配的砾石土), 土体的抗侵蚀阻力较小, 土体自身容易连续地被侵蚀, 形成稀性泥石流或泥流, 带动粗大颗粒的能力降低。

### 1.3 基于泥石流运动过程的分析

泥石流从支流逐级汇流运动的过程, 黏粒含量的多少进一步影响泥石流容重的演化。在泥石流自身运动过程中, 存在一定的振动频率, 如蒋家沟泥石流的频率为 1~10 Hz<sup>[1]</sup>, 泥石流的振动加速了泥石流沟岸的崩塌, 使更多的物质进入泥石流体, 从机理上讲, 一定的黏粒含量的土体, 其空隙会因黏粒含量的阻碍, 孔压增大<sup>[15]</sup>, 更有利于沟岸物质的加入泥石流体, 增加泥石流的容重。

$$E_v = \gamma_C \times \Delta H \times g - \int f ds. \quad (4)$$

从泥石流运动的能量守恒规律(4)式可知, 对于一定的沟床, 对于较高黏粒含量的黏粒泥石流, 其阻力  $f$  通常较小, 阻力的降低, 使得其所做的功  $f ds$  降低, 这必然导致动能  $E_v$  的增加。对于一定坡降的沟道, 其高差  $\Delta H$  的变化不大的情况下, 泥石流必然侵蚀沟床使得更多的底床物质加入泥石流体, 增加泥石流容重。

## 2 基于黏粒含量的泥石流容重计算

基于以上的分析, 可以知道黏土颗粒的含量与泥石流的容重是有一定的关系。基于这样的关系, 鉴于目前对非观测和其特征难以确定的泥石流, 其容重确定困难, 本文力图选择我国泥石流高发的西南地区特征明显的泥石流沟, 系统统计泥石流黏土颗粒( $< 0.005 \text{ mm}$ )与泥石流容重的关系, 建立数学模式, 并进行统计上的误差分析, 探索泥石流容重计算的新方法。

## 2.1 容重与黏粒含量数据的获取

### (i) 容重的获取

对于蒋家沟这样设有泥石流观察站的泥石流沟, 我们可以通过对泥石流直接取样, 称其重量、量其体积求得准确可靠的容重.

然而大部分泥石流是无法观测的, 对这些泥石流不能直接取样, 选择的这些泥石流沟大都有明显的特征记录、调访资料和当地目击者的描述. 这部分泥石流容重的确定是通过调查当地亲眼目睹过泥石流发生情景的村民、牧民或道班工人, 取泥石流堆积物现场配制泥石流体, 待其浓度与泥石流发生时相仿后, 称其重量、量其体积, 并且辅以经验公式校验和综合分析获得. 可以认为这些样本的数值相对可靠.

### (ii) 黏粒含量的获取

蒋家沟的黏粒含量是直接对取得的泥石流样进行颗粒分析(比重计法)求得, 其他 44 条泥石流沟的黏粒含量是通过泥石流堆积物龙头样的采集, 采用比重计法对其颗粒进行分析而获得.

## 2.2 黏粒含量和泥石流的容重关系特征分析

通过分析我国西部 44 条泥石流沟的 49 个样本和蒋家沟 1998, 2000 和 2001 年的 153 个泥石流的黏粒含量和容重, 将该数据列入表 1 和表 2 中, 进而点绘黏粒含量和泥石流的容重关系曲线及其趋势线(图 1).

通过以上曲线的分析可知黏粒含量在 5% 以下时, 泥石流的容重随黏粒含

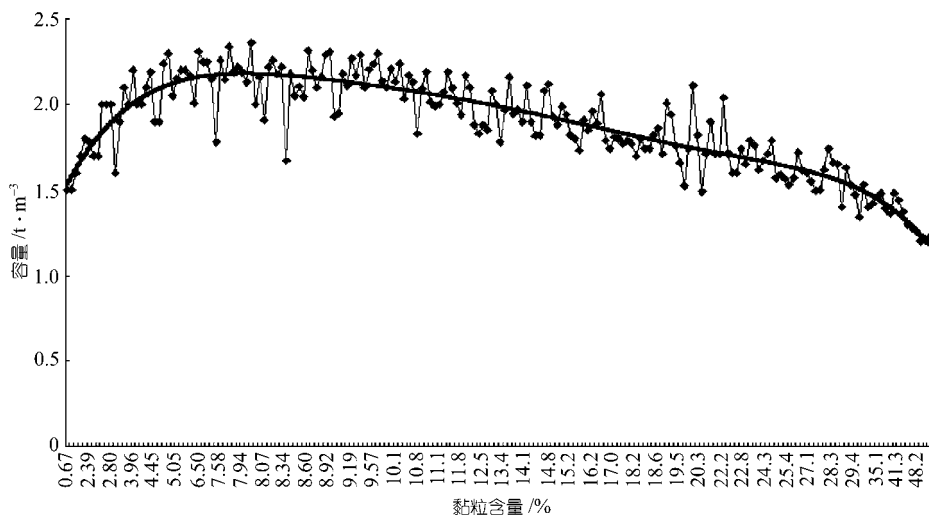


图 1 黏粒含量和泥石流容重的关系

表1 黏粒含量与泥石流容重关系

| 沟名          | 位置                       | 爆发<br>时间<br>(年份) | 黏粒含量/%<br>( $d < 0.005$<br>mm) | 容重/ $t \cdot m^{-3}$ |          |          | 相对误差/%   |          |
|-------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
|             |                          |                  |                                | 实<br>测<br>值          | (5)<br>式 | (6)<br>式 | (5)<br>式 | (6)<br>式 |
| 么堂子沟        | 宝兴县硃磬乡夹拉村                | 1990             | 4                              | 2                    | 1.95     | 1.86     | 2.50     | 7.0      |
| 张卡沟         | 宝兴县硃磬乡夹拉村                | 1974             | 2.8                            | 2                    | 1.86     |          | 7.29     |          |
| 福堂沟         | 汶川县银杏乡桃关村                | 1990             | 2.52                           | 2                    | 1.83     |          | 8.55     |          |
| K4742 段 1#沟 | 中尼公路段 K4742+700 处        | 1999             | 11.22                          | 2.16                 | 2.12     | 2.16     | 1.85     | 0.27     |
| K4742 段 2#沟 | 中尼公路段 K4742+700 处        | 1999             | 4.83                           | 2.05                 | 2.01     | 1.92     | 2.08     | 6.2      |
| K4742 段 3#沟 | 中尼公路段 K4742+700 处        | 1999             | 8.7                            | 2.1                  | 2.16     | 2.30     | 2.86     | 9.5      |
| 那坡沟         | 中尼公路 K4796+600 处         | 1999             | 4.19                           | 2.1                  | 1.96     | 1.87     | 6.45     | 10.8     |
| 吉堆普沟        | 中尼公路 K4806+050 处         | 1999             | 12.85                          | 2                    | 2.16     | 2.07     | 8.0      | 3.6      |
| K4980 泥石流   | 中尼公路 K4980               | 1999             | 1.91                           | 1.7                  | 1.77     |          | 4.12     |          |
| K4981 泥石流   | 中尼公路 K4981               | 1999             | 1.94                           | 1.8                  | 1.77     |          | 1.47     |          |
| 林康沟         | 中尼公路 K4991               | 1999             | 3.64                           | 1.6                  | 1.92     | 1.83     | 20.2     | 14.7     |
| 九道班 1#沟     | 中尼公路 K4994               | 1999             | 6.03                           | 2.2                  | 2.07     | 2.02     | 5.9      | 8        |
| 九道班 2#沟     | 中尼公路 K4994               | 1999             | 5.05                           | 2.15                 | 2.01     | 1.94     | 6.01     | 9.8      |
| 九道班 3#沟     | 中尼公路 K4994               | 1999             | 7.21                           | 2.15                 | 2.12     | 2.13     | 1.40     | 0.6      |
| 绒青沟         | 中尼公路 K5018+800           | 1999             | 4.45                           | 1.9                  | 1.98     | 1.89     | 4.35     | 0.4      |
| 门布对沟        | 中尼公路 K5254+600           | 1999             | 2.41                           | 1.7                  | 1.82     |          | 6.99     |          |
| 古乡沟         | 川藏公路 K4035~K4038         | 1953             | 2.78                           | 2.2                  | 1.85     |          | 15.9     |          |
| 瓦达沟         | 川藏公路 K690+300            | 1990             | 3.7                            | 1.9                  | 1.93     | 1.84     | 1.50     | 3.2      |
| 森格宗沟        | 川藏公路 K3824+720~K3825+100 | 1953             | 2.53                           | 2.0                  | 1.83     |          | 8.50     |          |
| 浑水沟         | 云南省盈江县                   | 1977             | 7.65                           | 2.09                 | 2.14     | 2.18     | 2.39     | 4.3      |
| 黑沙沟         | 云南省东川市阿旺区                | 1962             | 2.29                           | 2.06                 | 1.78     |          | 13.5     |          |
| 许家小河        | 云南省东川市                   |                  | 4.26                           | 2.19                 | 1.97     | 1.88     | 10.0     | 14.2     |
| 桃家小河        | 云南省东川市                   |                  | 0.67                           | 1.5                  | 1.63     |          | 9.11     |          |
| 拖沓沟         | 云南省东川市                   | 1962             | 2.47                           | 2.3                  | 1.82     |          | 20.8     |          |
| 铜厂箐         | 云南省东川市                   | 1982             | 4.65                           | 2.3                  | 2.0      | 1.91     | 15.0     | 17       |
| 大白泥沟        | 云南省东川市, 大白河左岸            | 1985             | 7.99                           | 2                    | 2.15     | 2.22     | 7.25     | 10.9     |
| 小白泥沟        | 云南省东川市, 大白河左岸            | 1980             | 6.24                           | 2                    | 2.08     | 2.04     | 3.66     | 1.6      |
| 腊利沟         | 云南省东川市南                  | 1983             | 1.51                           | 1.5                  | 1.72     |          | 15.3     |          |
| 尖山沟         | 云南省东川市, 小江下游右侧           | 1963             | 4.48                           | 1.9                  | 1.98     | 1.90     | 4.45     | 0.3      |
| 太平村沟        | 小江下游右岸                   | 1952             | 3.96                           | 2.2                  | 1.95     | 1.86     | 11.4     | 15.6     |
| 幸福村沟        | 云南省东川市                   |                  | 5.52                           | 2.2                  | 2.05     | 1.98     | 6.92     | 10.1     |
| 豆腐村沟        | 云南省东川市                   |                  | 5.82                           | 2.2                  | 2.06     | 2.0      | 6.21     | 8.9      |
| 蒋家沟         | 云南省东川市北部                 | 1980             | 8.66                           | 2.2                  | 2.16     | 2.29     | 3.76     | 4.3      |
| 米堆弄巴沟       | 然乌城西                     | 1988             | 2.5                            | 1.53                 | 1.82     |          | 19.4     |          |
| 德华沟         | 黑水县, 俄罗斯瓜子村              | 1987             | 6.04                           | 2.13                 | 2.07     | 2.02     | 2.82     | 4.9      |
| 拥呷顶沟        | 318 国道 K237+320~K237+400 | 1998             | 2.38                           | 1.78                 | 1.82     |          | 2.25     |          |
| 通戈顶沟        | 318 国道 K328+960~K330+100 | 1998             | 4.56                           | 2.2                  | 1.99     | 1.90     | 9.45     | 13.5     |
|             |                          | 2000             | 3.9                            | 2.0                  | 1.94     | 1.85     | 3.0      | 7.6      |
| 大干沟         | 雅拉河左岸                    | 1997             | 3.98                           | 1.9                  | 1.95     | 1.85     | 2.63     | 2.19     |
| 罗坝街沟        | 黑水城 7 km 处, 黑水河左岸        | 1933             | 1.83                           | 2.02                 | 1.76     |          | 12.8     |          |
|             |                          | 1983             | 5.437                          | 2.19                 | 2.05     | 1.97     | 6.67     | 9.9      |
|             |                          | 1984             | 4.44                           | 2.1                  | 1.98     | 1.89     | 5.71     | 9.9      |
|             |                          | 1997             | 5.25                           | 1.97                 | 2.03     | 1.95     | 3.05     | 0.7      |
| 普义沟         | 黑水城 7 km 处, 黑水河右岸        | 1969             | 4.92                           | 2.02                 | 2.01     | 1.93     | 0.50     | 4.4      |
| 俄罗斯瓜子沟      | 黑水县, 俄罗斯瓜子村              | 1886             | 4.761                          | 1.95                 | 2.00     | 1.91     | 2.56     | 1.7      |
| 无名沟         | 雅拉河右岸, 康定城北              | 1956             | 3.16                           | 2.2                  | 1.89     | 1.8      | 14.1     | 18       |
| 倍水沟         | 雅拉河左岸                    | 1998             | 4.05                           | 2                    | 1.95     | 1.85     | 2.50     | 6.8      |

表 2 1998, 2000 和 2001 年蒋家沟泥石流黏粒含量与其容重观测表

| 样本<br>编号 | 黏粒<br>含量<br>/% | 容重      |          |          | 相对误差/%    |           | 样本<br>编号 | 黏粒<br>含量<br>/% | 容重      |          |          | 相对误差/%    |           |
|----------|----------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
|          |                | 实测<br>值 | 多项<br>式值 | 对数<br>式值 | 多项式<br>误差 | 对数式<br>误差 |          |                | 实测<br>值 | 多项<br>式值 | 对数<br>式值 | 多项式<br>误差 | 对数式<br>误差 |
| 98-01    | 7.66           | 2.33    | 2.13     | 2.18     | 8.67      | 6.7       | 20-21    | 12.29          | 1.88    | 2.15     | 2.1      | 14.6      | 11.7      |
| 98-02    | 8.60           | 2.31    | 2.15     | 2.29     | 6.76      | 4.3       | 20-22    | 28.69          | 1.63    | 1.29     |          | 20.4      |           |
| 98-03    | 8.92           | 2.30    | 2.16     | 2.32     | 6.25      | 0.5       | 20-23    | 26.44          | 1.72    | 1.39     |          | 18.6      |           |
| 98-04    | 7.97           | 2.12    | 2.14     | 2.22     | 0.74      | 4.1       | 20-24    | 37.24          | 1.36    | 1.30     |          | 4.22      |           |
| 98-05    | 26.75          | 1.61    | 1.38     |          | 14.3      |           | 20-25    | 19.93          | 1.74    | 1.80     |          | 3.65      |           |
| 98-06    | 9.65           | 2.13    | 2.17     | 2.26     | 1.67      | 6.0       | 20-26    | 48.17          | 1.20    | 1.46     |          | 22.3      |           |
| 98-07    | 11.46          | 2.09    | 2.16     | 2.15     | 3.30      | 2.3       | 20-27    | 35.13          | 1.46    | 1.23     |          | 15.1      |           |
| 98-08    | 10.05          | 2.13    | 2.17     | 2.23     | 1.80      | 4.7       | 20-28    | 27.37          | 1.50    | 1.35     |          | 9.84      |           |
| 98-09    | 11.08          | 2.01    | 2.17     | 2.16     | 7.68      | 7.5       | 20-29    | 25.28          | 1.57    | 1.46     |          | 6.83      |           |
| 98-10    | 11.82          | 1.93    | 2.16     | 2.13     | 11.5      | 9.7       | 20-30    | 19.47          | 1.66    | 1.83     |          | 10.4      |           |
| 98-11    | 18.24          | 1.70    | 1.90     | 1.87     | 12.2      | 9.8       | 20-31    | 20.31          | 1.71    | 1.77     |          | 4.04      |           |
| 98-12    | 25.38          | 1.56    | 1.45     |          | 6.96      |           | 20-32    | 22.84          | 1.65    | 1.61     |          | 2.18      |           |
| 98-13    | 27.22          | 1.49    | 1.35     |          | 9.01      |           | 20-33    | 23.96          | 1.62    | 1.54     |          | 4.78      |           |
| 98-14    | 19.50          | 1.52    | 1.83     |          | 20.2      |           | 20-34    | 24.20          | 1.67    | 1.52     |          | 8.52      |           |
| 98-15    | 34.81          | 1.41    | 1.23     |          | 13.1      |           | 20-35    | 41.25          | 1.44    | 1.49     |          | 3.53      |           |
| 98-16    | 9.57           | 2.23    | 2.17     | 2.27     | 2.95      | 1.5       | 20-36    | 7.92           | 2.36    | 2.14     | 2.21     | 9.26      | 6.4       |
| 98-17    | 8.26           | 2.17    | 2.15     | 2.25     | 1.22      | 3.2       | 20-37    | 9.24           | 2.17    | 2.16     | 2.3      | 0.10      | 5.8       |
| 98-18    | 13.37          | 1.94    | 2.11     | 2.03     | 8.89      | 4.4       | 20-38    | 14.60          | 2.08    | 2.08     | 1.99     | 0.37      | 4.2       |
| 98-19    | 14.49          | 1.81    | 2.09     | 2.0      | 15.1      | 9.9       | 20-39    | 15.19          | 1.82    | 2.06     | 1.97     | 13.4      | 8.2       |
| 98-20    | 8.51           | 2.10    | 2.15     | 2.28     | 2.46      | 8.1       | 20-40    | 23.85          | 1.76    | 1.54     |          | 11.9      |           |
| 98-21    | 24.50          | 1.79    | 1.50     |          | 15.6      |           | 20-41    | 20.45          | 1.90    | 1.77     |          | 6.84      |           |
| 98-22    | 22.22          | 1.71    | 1.65     |          | 15.6      |           | 20-42    | 20.19          | 2.11    | 1.78     |          | 15.3      |           |
| 98-23    | 9.10           | 1.95    | 2.16     | 2.31     | 11.0      | 18.3      | 20-43    | 8.07           | 1.91    | 2.14     | 2.23     | 12.4      | 16.6      |
| 98-24    | 16.88          | 1.79    | 1.98     | 1.9      | 10.8      | 6.6       | 20-44    | 35.75          | 1.84    | 1.25     |          | 15.3      |           |
| 98-25    | 11.18          | 2.07    | 2.17     | 2.07     | 4.73      | 4.4       | 01-01    | 16.58          | 1.79    | 1.99     | 1.92     | 11.6      | 7.2       |
| 98-26    | 9.41           | 2.20    | 2.17     | 2.28     | 1.60      | 3.5       | 01-02    | 18.32          | 1.74    | 1.90     | 1.86     | 9.35      | 7.2       |
| 98-27    | 7.59           | 2.14    | 2.13     | 2.17     | 0.60      | 3.8       | 01-03    | 9.08           | 1.39    | 2.16     | 2.31     | 12.2      | 19.6      |
| 98-28    | 8.53           | 2.04    | 2.15     | 2.28     | 5.53      | 11.5      | 01-04    | 15.27          | 1.80    | 2.06     | 1.97     | 14.4      | 9.7       |
| 98-29    | 10.32          | 2.03    | 2.17     | 2.02     | 6.82      | 0.9       | 01-05    | 19.74          | 1.76    | 1.83     |          | 4.13      |           |
| 98-30    | 16.30          | 1.89    | 2.01     | 1.93     | 6.50      | 3.1       | 01-06    | 18.25          | 1.80    | 1.90     | 1.87     | 5.94      | 3.7       |
| 98-31    | 18.61          | 1.86    | 1.88     | 1.86     | 1.37      | 0.2       | 01-07    | 21.17          | 1.71    | 1.72     |          | 0.77      |           |
| 20-01    | 9.11           | 2.18    | 2.16     | 2.31     | 0.63      | 5.7       | 01-08    | 25.89          | 1.57    | 1.42     |          | 9.03      |           |
| 20-02    | 11.28          | 2.19    | 2.16     | 2.16     | 0.95      | 1.5       | 01-11    | 11.66          | 2.01    | 2.16     | 2.13     | 0.39      | 6.2       |
| 20-03    | 16.19          | 1.96    | 2.01     | 19.3     | 2.98      | 1.4       | 01-12    | 12.67          | 1.85    | 2.14     | 2.08     | 16.0      | 12.5      |
| 20-04    | 36.94          | 1.39    | 1.29     |          | 7.10      |           | 01-13    | 18.9           | 1.71    | 1.86     | 1.85     | 9.23      | 8.1       |
| 20-07    | 12.49          | 1.83    | 2.15     | 2.09     | 17.5      | 14.2      | 01-14    | 15.31          | 1.73    | 2.05     | 1.97     | 19.0      | 13.6      |
| 20-08    | 29.44          | 1.47    | 1.27     |          | 13.5      |           | 01-15    | 25.42          | 1.53    | 1.45     |          | 4.92      |           |
| 20-09    | 13.80          | 1.97    | 2.11     | 2.03     | 7.40      | 2.9       | 01-16    | 33.12          | 1.40    | 1.21     |          | 13.2      |           |
| 20-10    | 14.76          | 2.12    | 2.08     | 1.99     | 1.82      | 6.3       | 01-17    | 14.42          | 1.90    | 2.09     | 2.0      | 10.2      | 5.3       |
| 20-11    | 10.65          | 2.13    | 2.17     | 2.20     | 2.03      | 3.1       | 01-18    | 14.97          | 1.94    | 2.07     | 1.98     | 6.86      | 2.0       |
| 20-12    | 11.14          | 2.00    | 2.17     | 2.17     | 8.25      | 8.25      | 01-19    | 16.44          | 2.06    | 2.00     | 1.92     | 2.62      | 6.6       |
| 20-15    | 8.34           | 1.67    | 2.15     | 2.26     | 28.9      | 35.1      | 01-20    | 20.26          | 1.82    | 1.78     |          | 2.07      |           |
| 20-16    | 8.86           | 2.29    | 2.16     | 2.32     | 5.56      | 1.2       | 01-21    | 18.19          | 1.77    | 1.91     | 1.78     | 7.39      | 5.6       |
| 20-17    | 8.19           | 2.26    | 2.15     | 2.24     | 4.87      | 0.9       | 01-22    | 17.44          | 1.77    | 1.95     | 1.89     | 10.3      | 6.8       |
| 20-18    | 2.28           | 1.49    | 1.78     |          | 19.5      |           | 01-23    | 22.53          | 1.60    | 1.63     |          | 2.14      |           |
| 20-19    | 14.58          | 1.82    | 2.08     | 1.99     | 14.7      | 9.6       | 01-24    | 29.34          | 1.53    | 1.27     |          | 16.7      |           |
| 20-20    | 7.48           | 1.78    | 2.13     | 2.16     | 19.7      | 21.6      | 01-25    | 42.99          | 1.37    | 1.56     |          | 14.3      |           |

续表 2

| 样本<br>编号 | 黏粒<br>含量<br>/% | 容重      |          |          | 相对误差/%    |           | 样本<br>编号 | 黏粒<br>含量<br>/% | 容重      |          |          | 相对误差/%    |           |
|----------|----------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
|          |                | 实测<br>值 | 多项<br>式值 | 对数<br>式值 | 多项式<br>误差 | 对数式<br>误差 |          |                | 实测<br>值 | 多项<br>式值 | 对数<br>式值 | 多项式<br>误差 | 对数式<br>误差 |
| 01-30    | 9.71           | 2.10    | 2.17     | 2.26     | 3.43      | 7.6       | 01-64    | 14.94          | 1.99    | 2.07     | 1.98     | 4.23      | 0.5       |
| 01-31    | 12.50          | 1.88    | 2.15     | 2.09     | 14.3      | 11.2      | 01-65    | 19.25          | 1.94    | 1.84     |          | 4.83      |           |
| 01-32    | 13.15          | 1.78    | 2.13     | 2.06     | 19.9      | 15.6      | 01-66    | 24.32          | 1.71    | 1.52     |          | 11.1      |           |
| 01-33    | 16.11          | 1.85    | 2.02     | 1.94     | 9.31      | 4.6       | 01-67    | 6.92           | 2.25    | 2.11     | 2.11     | 6.15      | 6.15      |
| 01-34    | 22.43          | 1.60    | 1.64     |          | 2.54      |           | 01-68    | 6.50           | 2.31    | 2.09     | 2.07     | 9.31      | 10.5      |
| 01-35    | 31.05          | 1.34    | 1.23     |          | 8.15      |           | 01-69    | 13.96          | 2.16    | 2.11     | 2.02     | 2.29      | 6.5       |
| 01-38    | 10.30          | 2.24    | 2.17     | 2.22     | 2.95      | 0.9       | 01-70    | 16.74          | 1.74    | 1.99     | 1.91     | 14.5      | 10        |
| 01-39    | 10.76          | 1.83    | 2.17     | 2.19     | 18.7      | 19.6      | 01-71    | 22.81          | 1.74    | 1.61     |          | 7.31      |           |
| 01-40    | 7.78           | 2.19    | 2.14     | 2.21     | 2.19      | 0.7       | 01-72    | 27.44          | 1.62    | 1.34     |          | 16.7      |           |
| 01-41    | 10.81          | 2.19    | 2.17     | 2.19     | 0.80      | 0.2       | 01-73    | 7.58           | 2.26    | 2.13     | 2.17     | 5.58      | 3.8       |
| 01-42    | 9.28           | 2.10    | 2.16     | 2.29     | 3.25      | 9.1       | 01-74    | 27.12          | 1.55    | 1.36     |          | 11.9      |           |
| 01-43    | 9.13           | 2.11    | 2.16     | 2.3      | 2.68      | 9.2       | 01-75    | 22.22          | 2.04    | 1.65     |          | 18.9      |           |
| 01-44    | 23.24          | 1.79    | 1.58     |          | 11.2      |           | 01-76    | 14.85          | 1.93    | 2.07     | 1.98     | 7.66      | 2.7       |
| 01-45    | 25.92          | 1.59    | 1.42     |          | 10.2      |           | 01-77    | 14.02          | 1.90    | 2.10     | 2.02     | 10.9      | 6.2       |
| 01-46    | 32.05          | 1.53    | 1.21     |          | 20.4      |           | 01-78    | 6.78           | 2.25    | 2.10     | 2.09     | 6.38      | 6.9       |
| 01-47    | 17.01          | 1.80    | 1.97     | 1.9      | 9.81      | 5.8       | 01-79    | 7.94           | 2.19    | 2.14     | 2.21     | 2.11      | 1.0       |
| 01-48    | 8.81           | 2.16    | 2.16     | 2.31     | 0.09      | 7.0       | 01-80    | 14.92          | 1.88    | 2.07     | 1.98     | 10.3      | 5.3       |
| 01-49    | 12.24          | 2.10    | 2.15     | 2.1      | 2.64      | 0.2       | 01-81    | 27.04          | 1.60    | 1.36     |          | 14.3      |           |
| 01-50    | 28.46          | 1.65    | 1.31     |          | 20.8      |           | 01-82    | 8.12           | 2.22    | 2.14     | 2.23     | 2.23      | 0.6       |
| 01-51    | 28.07          | 1.74    | 1.32     |          | 24.0      |           | 01-86    | 9.84           | 2.21    | 2.17     | 2.25     | 1.69      | 1.8       |
| 01-53    | 12.68          | 2.08    | 2.14     | 2.08     | 3.19      | 0.0       | 01-87    | 9.28           | 2.29    | 2.16     | 2.29     | 5.31      | 0.0       |
| 01-54    | 8.00           | 2.16    | 2.14     | 2.22     | 0.68      | 2.6       | 01-88    | 14.09          | 2.11    | 2.10     | 2.01     | 0.19      | 4.5       |
| 01-55    | 19.08          | 2.01    | 1.85     |          | 7.62      |           | 01-89    | 18.53          | 1.82    | 1.89     | 1.86     | 3.86      | 2.1       |
| 01-56    | 15.85          | 1.91    | 2.03     | 1.94     | 6.25      | 1.8       | 01-90    | 18.29          | 1.74    | 1.90     | 1.87     | 9.46      | 7.2       |
| 01-58    | 43.06          | 1.30    | 1.56     |          | 14.3      |           | 01-91    | 10.62          | 2.17    | 2.17     | 2.20     | 0.16      | 3.1       |
| 01-59    | 17.01          | 1.81    | 1.97     | 1.9      | 9.20      | 5.8       | 01-92    | 8.33           | 2.22    | 2.15     | 2.26     | 3.02      | 1.6       |
| 01-60    | 11.13          | 1.99    | 2.17     | 2.17     | 9.07      | 8.8       | 01-93    | 11.89          | 2.17    | 2.16     | 2.12     | 0.39      | 2.2       |
| 01-61    | 8.39           | 2.18    | 2.15     | 2.26     | 1.18      | 3.8       | 01-94    | 13.42          | 1.97    | 2.12     | 2.04     | 7.98      | 3.8       |
| 01-62    | 7.87           | 2.22    | 2.14     | 2.21     | 3.51      | 0.7       | 01-95    | 21.03          | 1.71    | 1.73     |          | 1.31      |           |
| 01-63    | 10.77          | 2.09    | 2.17     | 2.19     | 3.96      | 4.7       |          |                |         |          |          |           |           |

量的增加而增大;黏粒含量在5%~10.5%之间时泥石流的容重在2.15 t/m<sup>3</sup>(黏粒含量在该区间内泥石流体的平均容重为2.15)左右波动;黏粒含量超过10.5%后泥石流的容重开始随黏粒含量的增加而降低。

另外,当黏粒含量很低(2.5%以下)的时候泥石流流体的容重一般很小,除了个别泥石流沟或阵次外泥石流体的容重一般不超过1.8 t/m<sup>3</sup>,即以稀性泥石流为主。通过统计分析发现,在这些统计数据中黏粒含量在10%以下的稀性泥石流其黏粒含量的平均值为2.41%。而黏粒含量在3%~18%之间,泥石流的容重一般不小于1.8 t/m<sup>3</sup>,即为黏性泥石流。当黏粒含量过高(18%以上),形成泥流。黏粒含量低的稀性泥石流随黏粒含量的降低向水石流的方向发展。



## 2.3 不同类型的泥石流容重与黏粒含量的关系模式

通过对图 1 所示的趋势曲线进行回归分析,发现该曲线用 6 次以上的多项式曲线拟合较好,于是我们用 6 次以上的多项式方程对该趋势线进行模拟.通过不断修正方程中各项的系数,并计算相应黏粒含量的容重、相对误差(计算容重与实测容重之差的绝对值与实测容重的比值),使得相对误差不断减小,最后得到平均相对误差最小(7.9%)的方程:

$$\gamma_C = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 \times 10^2 x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55, \quad (5)$$

该式反映了黏粒含量与容重的多项式统计关系,黏粒与容重的关系不是直线关系的而是一个上凸形的曲线.该方程反映了泥石流的容重随黏粒含量的变化的非线性特征,一定范围的黏粒含量有利于泥石流的容重的提高.稀性泥石流的容重随着黏粒含量的增加而增加,泥流的容重则随着黏粒含量的增加而降低,黏性泥石流存在一个峰值容重,该峰值容重对应的有一个最佳的黏粒含量.用方程计算的容重与实际分析的容重相比较,并将其相对误差分别列入表 1 和表 2 中.多项式模拟的结果其相对误差小于 5%, 10%, 15% 和 20% 的个数,分别占总计数数据的 36.5%, 67.01%, 84.36% 和 94.31%.这说明该模式的计算值与实验值的误差较小,该模式具有很强的实用性.而相对误差超过 20% 的数据中黏粒含量在 28% 以上的占 76.92%; 相对误差超过 15% 的数据中黏粒含量在 20% 以上的占 75.57%.对一般泥石流而言,黏粒含量大多数集中在 20% 以下,说明该模式具有广泛的应用性.该方程所计算的泥石流最大容重为 2.18,这表明对于高容重的黏性泥石流来讲,其应用具有一定的局限性.而对于多项式而言,其各项的物理意义确定困难,这些限制了(5)式的应用.特别地对于分布广危害大的黏性泥石流,鉴于样本丰富且集中,特别地对其模式进行模拟.

## 2.4 黏性泥石流容重与黏粒含量的关系式

通过对表 1 和表 2 黏粒含量在 3%~18% 之间、容重大于 1.8 g/cm<sup>3</sup> 黏性泥石流以及容重和黏力含量的关系进行对数关系式的计算机模拟,给出数学模式为

$$\gamma_C = \log \left[ \frac{x + 0.23}{|x - 0.089| + 0.1} \right] + e^{-20x-1} + 1.1, \quad (6)$$

其中的  $x$  为泥石流中的黏粒含量.因为黏性泥石流容重的较大值一般出现在黏粒含量为 8%~9% 之中,所以在容重与黏粒含量的近似曲线中,我们选取为 8.9% 以作近似值,以  $x - 0.089$  作为对数函数的主体,后面的指数函数不过是对第 1 项对数函数的修正,尤其是对黏粒含量较小的泥石流体.在黏粒含量大于 10% 以后,该项的影响基本可以忽略不计.常量 1.1 表示流体在黏粒含量为 0 的理想状态下

的流体容重, 该数值同时用于对整个方程的修正. 该方程反映了黏性泥石流容重的最大值在黏粒含量为 8.9%附近, 说明一定的黏粒含量是促进黏性泥石流发展的物质基础. 但过多的黏粒或过少的黏粒均不利于黏性泥石流的发展, 这从另一角度反映岩性、植被等自然因素对泥石流形成影响的两面性, 有助于解释板岩、泥砂岩地区容易激发黏性泥石流的机理, 同时有利于解释植被对水力类泥石流和土力类泥石流影响程度不同的机理.

统计的总样本数为 125 个, 计算结果显示, 误差在 5% 内的样本数目为 55 个, 占总样本数的 44%; 误差在 10% 以内的样本数为 100 个, 约占总样本数的 80%; 误差在 15% 以内的样本数为 115 个, 约占总样本数的 92%; 误差在 20% 以内的样本数为 123 个, 约占总样本数的 98.4%. 这表明用对数为主体的方程应用于黏性泥石流的容重计算具有很高的可信度, 计算结果与实际测量值吻合较好. 该公式计算的泥石流容重最大值为  $2.32 \text{ g/cm}^3$ , 适用于黏粒含量大于 3%, 小于 18% 的黏性泥石流体.

### 3 结论

(i) 通过对我国西南地区 45 条典型泥石流沟的容重与黏粒含量关系的统计分析, 基于黏粒含量利用多项式对泥石流容重进行计算取得良好的结果, 所建立的模式((5)式)可广泛应用于无法观测的不同类型(稀性和黏性)的泥石流容重计算. 计算与实际观测分析的结果的平均相对误差为 7.9%, 相对误差小于 5%、小于 10%、小于 15% 和 20% 的个数分别占总统计数据个数的 36.5%, 67.01%, 84.36% 和 94.31%. 这说明该模式的计算值与实验值的误差较小, 该模式具有很强的实用性. 而相对误差超过 20% 的数据中黏粒含量在 28% 以上的泥流占 76.92%; 相对误差超过 15% 的数据中黏粒含量在 20% 以上的占 75.57%. 对一般泥石流而言黏粒含量大多数集中在 18% 以下. 说明该模式具有广泛的应用性.

(ii) 特别地对于黏性泥石流, 其容重大于  $1.8 \text{ g/cm}^3$ , 其黏粒含量集中于 3%~18%. 通过以对数为主体变量的关系式模拟, 发现黏性泥石流的容重计算可用具有一定物理意义的对数方程进行, 而且误差较小. 误差在 5% 内的样本数目为 55 个, 占总样本数的 44%; 误差在 10% 以内的样本数为 100 个, 约占总样本数的 80%; 误差在 15% 以内的样本数为 115 个, 约占总样本数的 92%; 误差在 20% 以内的样本数为 123 个, 约占总样本数的 98.4%.

(iii) 泥石流黏粒含量与容重的关系是黏粒含量影响泥石流的形成, 影响泥石流的运动和泥石流悬浮颗粒粒径的结果, 其机理清楚.

(iv) 统计结果表明黏粒含量很少(3%以下)时, 形成的泥石流通常为稀性泥石流, 这种泥石流体的容重随黏粒含量的减少而减小, 这种泥石流随着黏粒含量的降低向水石流或者夹沙水流的状态发展. 黏粒含量在 5%~18% 之间时, 容易形

成黏性泥石流;黏粒含量在 5%~10%时泥石流的容重随黏粒含量的增加而增加;黏粒含量在 10%~18%时泥石流的容重随黏粒含量的增加而减小.黏粒含量超过 18%时,容易形成稀性泥石流,这时候形成的稀性泥石流的容重与低黏粒含量时形成的稀性泥石流随黏粒含量的变化趋势相反,性质方面也有很大差别,这种泥石流随黏粒含量的增加向泥流演变.黏粒含量在 7%~11%之间时形成的泥石流的容重平均值最大.

## 参 考 文 献

- 1 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测与研究. 北京: 科学出版社, 1990
- 2 Scott K V. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system. U S, Geological Survey Professional Paper. Denver, 1988. 51~52
- 3 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流体容重及其确定方法. 见: 泥石流防治指南. 北京: 科学出版社, 1991. 51~52
- 4 甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流地区公路工程. 北京: 人民交通出版社. 1981. 58~60
- 5 唐邦兴. 中国泥石流. 北京: 商务印书馆, 2000. 192~212
- 6 Pérez F L. Matrix granulometry of catastrophic debris flows(December 1999) in central coastal Venezuela. Catena, 2001, 45: 163~183[DOI]
- 7 Cannon S H. Debris-flow response of southern California watersheds burned by fire. Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment. Proceedings of the Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. Taipei, 2002. 45~52
- 8 Pierson T C. Dominant particle support mechanisms in debris flow at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. Sedimentology, 1981, 28: 49~60
- 9 Ellen S D, Fleming R W. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. In: Costa J E, Wieczorek G F, eds. Debris Flows, Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, Vol 7. Geological Society of America, Boulder, CO, 1987. 31~40
- 10 Seibly M J. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford University Press, 1982. 264
- 11 田连权. 泥石流侵蚀搬运与堆积. 成都: 成都地图出版社, 1993. 185~187
- 12 汪闻韶. 土的动力强度和液化特征. 北京: 中国电力出版社, 1997. 1~169
- 13 刘 颖, 谢君斐. 砂土震动液化. 北京: 地震出版社, 1984. 1~101
- 14 Wong R T, Seed H B, Han C K. Cyclic loading liquefaction of gravely soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, 1975, Vol. 101, No. GT6
- 15 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 4~22