

坡度和径流量对细沟侵蚀的影响

李妍敏，安翼，刘青泉

中科院力学所环境力学实验室

2011年8月24日

报告内容

1. 研究的背景和意义
2. 研究现状
3. 理论分析和数值模型
4. 数值结果和讨论
5. 结论

1. 研究的背景和意义

1. 土壤侵蚀是一个世界性的环境问题

- 我国：37.2%国土面积被侵蚀
- 美国：年损失\$430亿

2. 我国黄土高原地区的土壤侵蚀尤其严重

- 侵蚀面积占总面积65%(2002)
- 地貌支离破碎，影响农业
- 泥沙进入河道，危害防洪安全

3. 黄土高原土壤侵蚀中水力侵蚀占主要地位

- 水蚀面积占侵蚀面积85.7%



马达加斯加的切沟地貌



黄土高原的梁峁地貌

1. 研究的背景和意义

4. 细沟侵蚀在坡面侵蚀中的非常重要

- 水沙汇集和运输的通道
- 集中的水流——侵蚀的来源



5. 细沟侵蚀研究的主要困难

- 水流和侵蚀的相互适应过程
- 细沟的侵蚀规律复杂
- 细沟侵蚀的分布形式复杂



坡面上的细沟形态

细沟侵蚀规律和机制是坡面侵蚀中的关键问题!

2. 研究现状

1. 细沟水流的流动特点

吴普特&周佩华,沙际德&蒋允静(1993),姚文艺&陈国祥(1995), Nearing(1998), Myers(2002), 张光辉(2003), Shao X.J.(2003), 敬向锋(2007), 王光谦(2010)

- I. 低Re数湍流、通常急流
- II. 受边界条件影响巨大

2. 细沟水流的侵蚀特点

Elliot & Laflen(1993), WEPP(1995), Nearing(1998), EUROSEM(1998), DWEPP(2003), Liu et al.(2005,2006), Tayfur et al.(2007), Nord & Esteves(2005,2007)

- I. 侵蚀剧烈、集中，侵蚀分阶段进行
- II. 非均衡侵蚀、输沙过程

2. 研究现状

3. 细沟侵蚀的临界坡度讨论

Horton: 当坡度达到 40° 时, 坡面的侵蚀力最大;

蒋定生、黄国俊: 坡度在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内, 土壤冲刷量随着坡度变陡而增加; 至 20° 时, 随着坡度的增加, 其增加率变缓; 当坡度超过 25° 时, 冲刷量反而减少;

陈法扬: 坡度在 $18^\circ \sim 25^\circ$ 范围内是土壤冲刷量剧增, 当 $S > 25^\circ$ 之后, 土壤冲刷量随坡度变陡而减少;

- I. 决定细沟侵蚀大小和分布的**决定因素**尚未找到
- II. 细沟侵蚀与相关**参数的规律**尚不明晰
- III. 细沟侵蚀中的**动力学机制**远未讨论清楚

排除复杂过程影响的细沟侵蚀规律探讨!

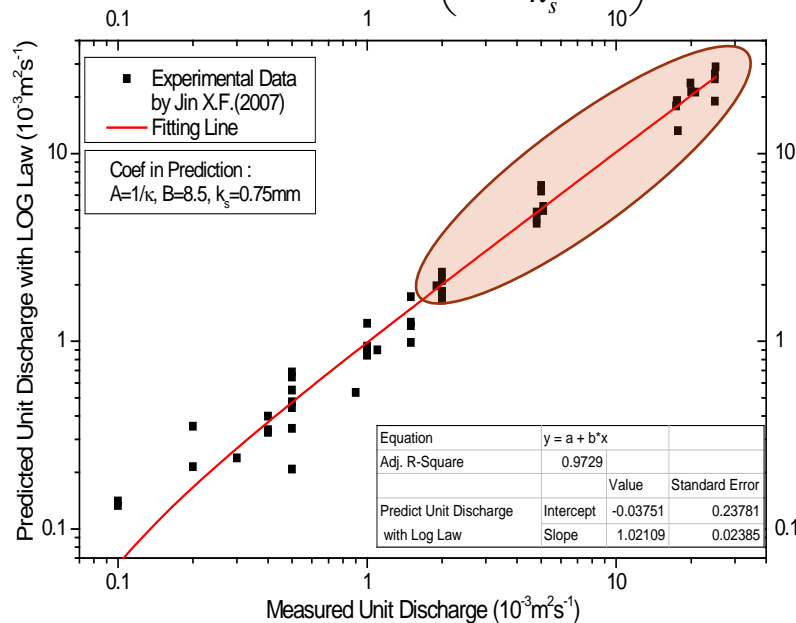
3. 理论分析和数值模型

1. 细沟水流的描述
2. 细沟侵蚀的控制方程
3. 数值模型的验证

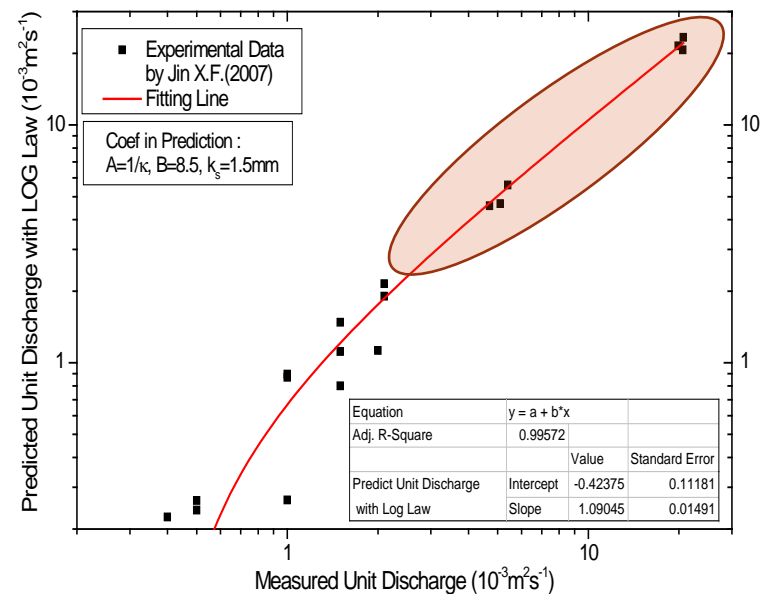
3.1 细沟水流的描述

- 细沟水流的方程——圣维南方程的适用性检查

$$q = \int_{k_s}^h u_\tau \left(B \ln \frac{y}{k_s} + C \right) dy = \sqrt{ghS_f} \left[(C - B)(h - k_s) + Bh \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \right]$$



$k_s \sim [0.5, 1] \text{ mm}$, $h \sim [0.7, \mathbf{16.8}] \text{ mm}$

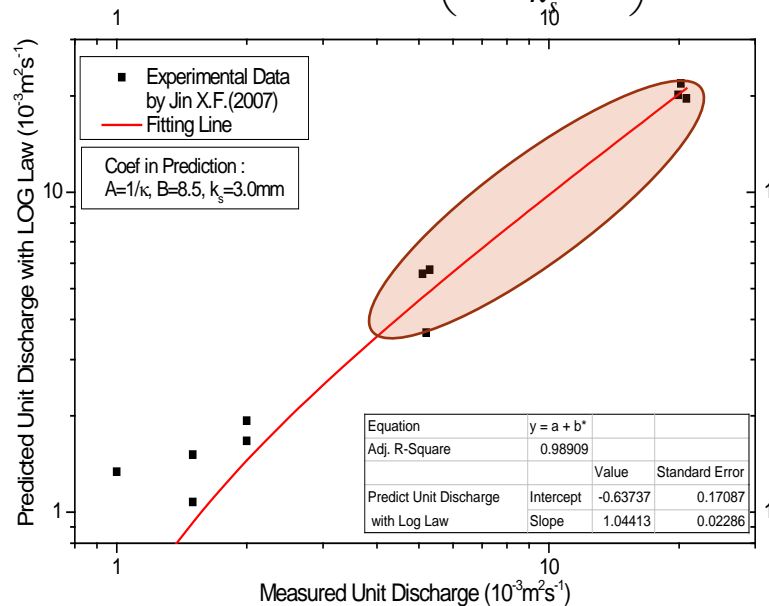


$k_s \sim [1, 1.5] \text{ mm}$, $h \sim [1.2, \mathbf{11.9}] \text{ mm}$

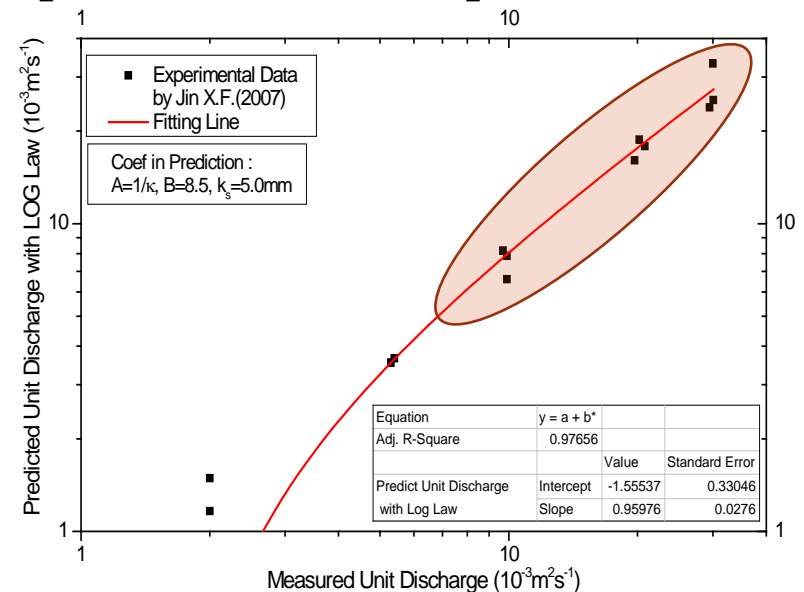
3.1 细沟水流的描述

- 细沟水流的方程——圣维南方程的适用性检查

$$q = \int_{k_s}^h u_{\tau} \left(B \ln \frac{y}{k_s} + C \right) dy = \sqrt{ghS_f} \left[(C - B)(h - k_s) + Bh \ln \left(\frac{h}{k_s} \right) \right]$$



$k_s \sim [2, 5] \text{ mm}$, $h \sim [1.4, \underline{17.6}] \text{ mm}$



$k_s \sim [5, 10] \text{ mm}$, $h \sim [1.4, \underline{22.1}] \text{ mm}$

细沟水流服从对数律，Q较大时可简化为圣维南方程

3.2 细沟侵蚀的控制方程

1. 细沟水流的控制方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_l$$

Singh (1996)

$$\cancel{\frac{\partial v}{\partial t}} + v \cancel{\frac{\partial v}{\partial x}} + g \cancel{\frac{\partial h}{\partial x}} = g(S_0 - S_f) + q_L \frac{u_L}{h}$$

2. 细沟内的非饱和输沙模型

$$\frac{\partial(hBC)}{\partial t} + \frac{\partial(qBC)}{\partial x} = D_r W + S_{s_lat}$$

$$D_r = \alpha(T_c - q_s)$$

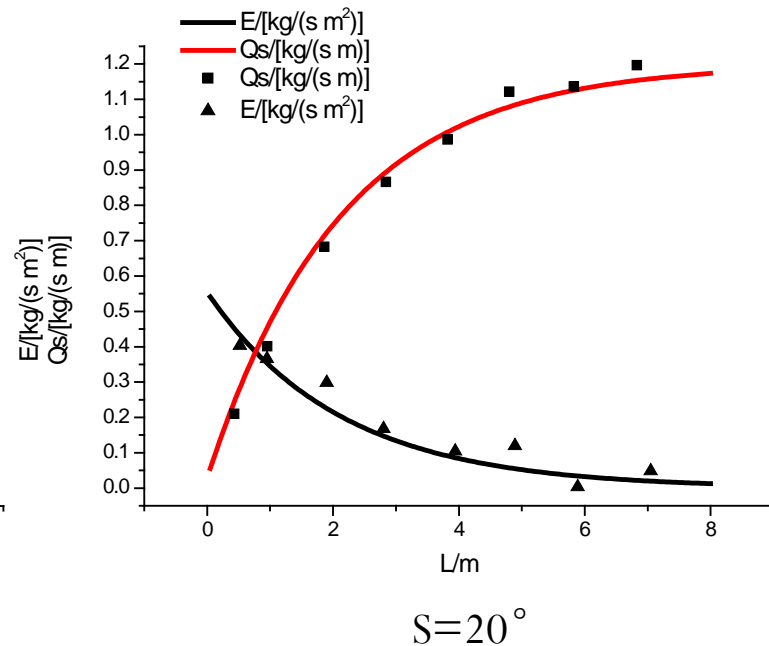
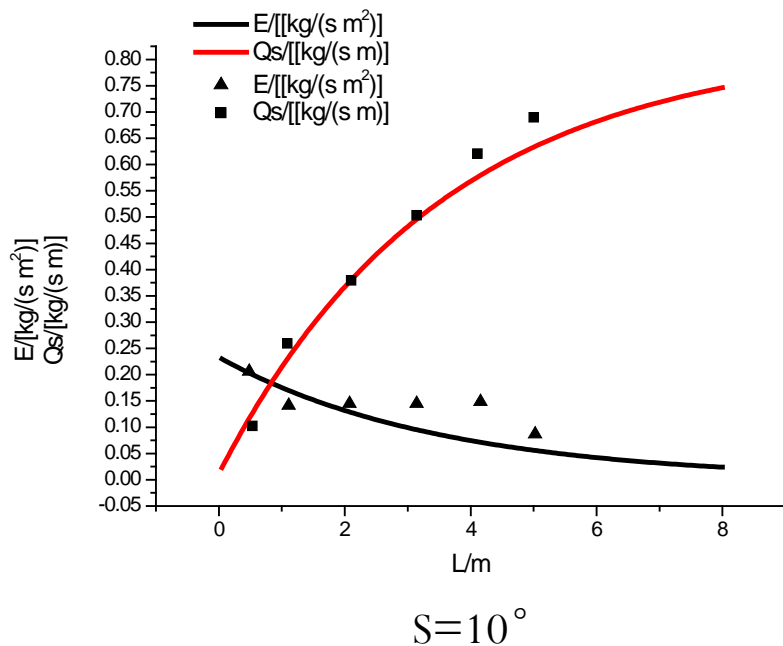
系数 α 使用数据校正获得，也可使用半经验公式：

$$\frac{1/\alpha}{R} = 1.5 \times 10^4 \left[\frac{\tau - \tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} \right]^{0.15} \left(\frac{u}{\sqrt{gd}} \right)^{-1} S_0^{1.5} \quad \text{Li et al. (2003)}$$

3.3 数值模型的验证

• 一维细沟输沙能力验证

上方来流：8L/min，无降雨，坡长：8m，坡度：10°、20°，曼宁系数：0.07，粒径：2.9 X 10⁻⁵m。实验数据采用雷廷武的细沟实验



4. 数值结果和讨论

无侧向入汇条件的细沟侵蚀数值实验：

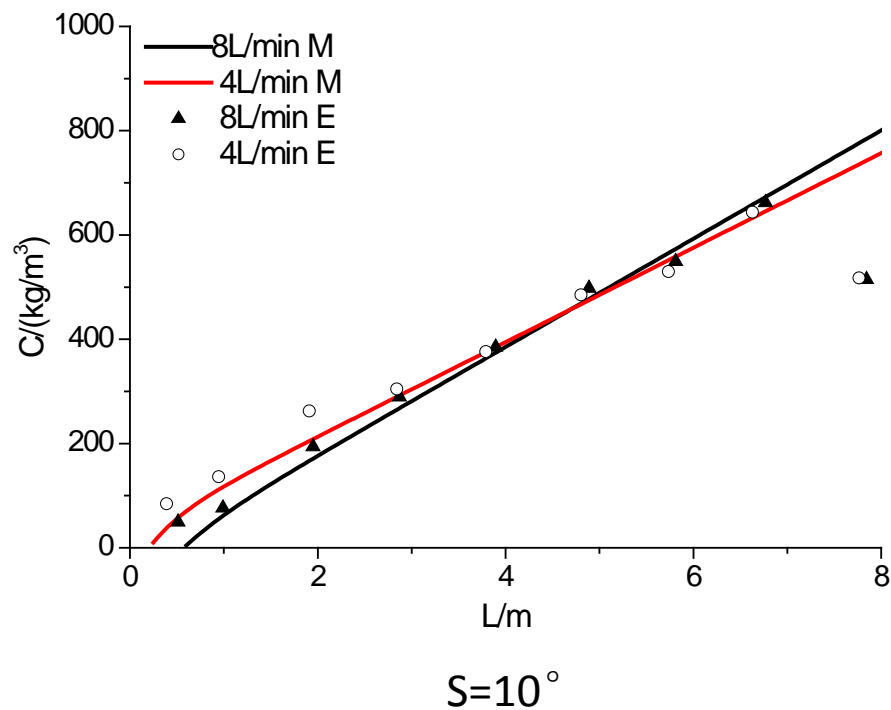
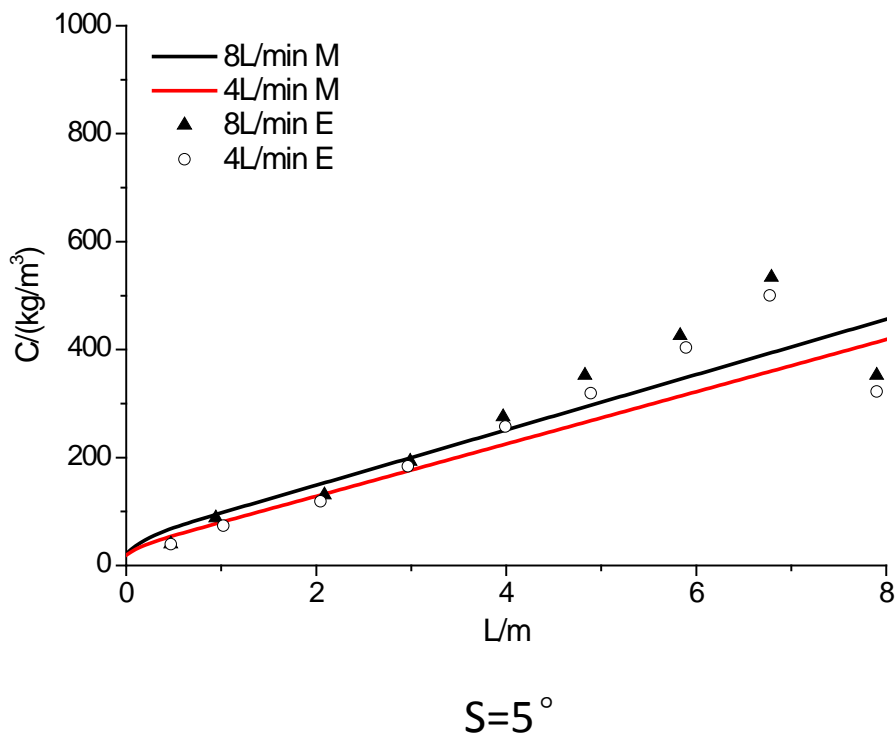
	$S=5^\circ$	$S=10^\circ$	$S=15^\circ$	$S=20^\circ$	$S=25^\circ$
$Q=2\text{L}/\text{min}$			√	√	√
$Q=4\text{L}/\text{min}$	√	√	√	√	√
$Q=8\text{L}/\text{min}$	√	√	√	√	√

比照雷廷武（2009）细沟实验展开：

全部为顶部放水实验，无侧向质量、动量源汇，不考虑细沟的侧向发展，分段测量侵蚀的空间分布

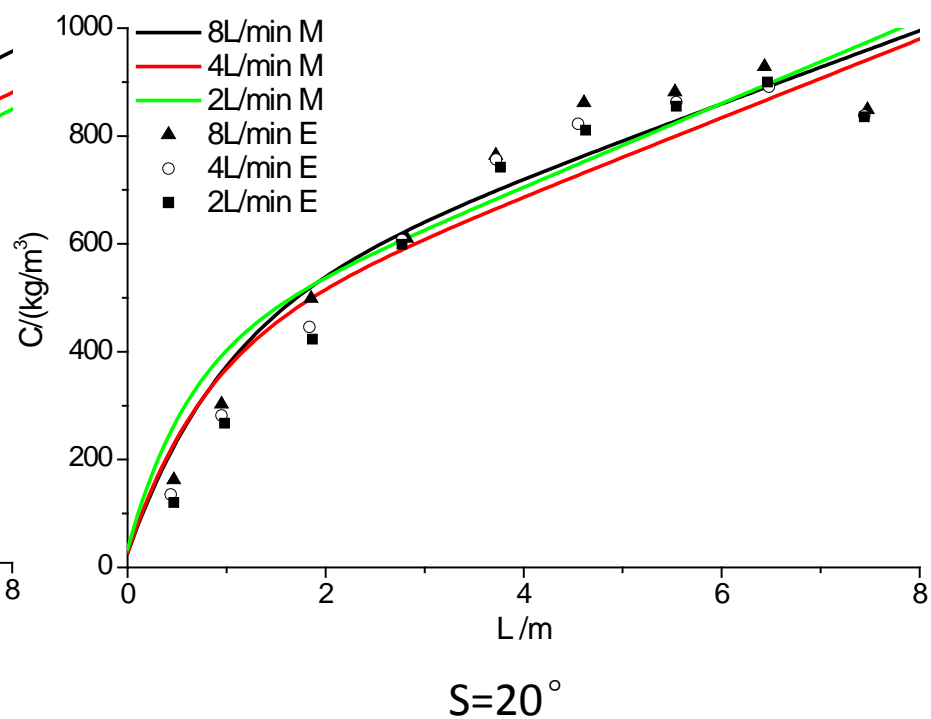
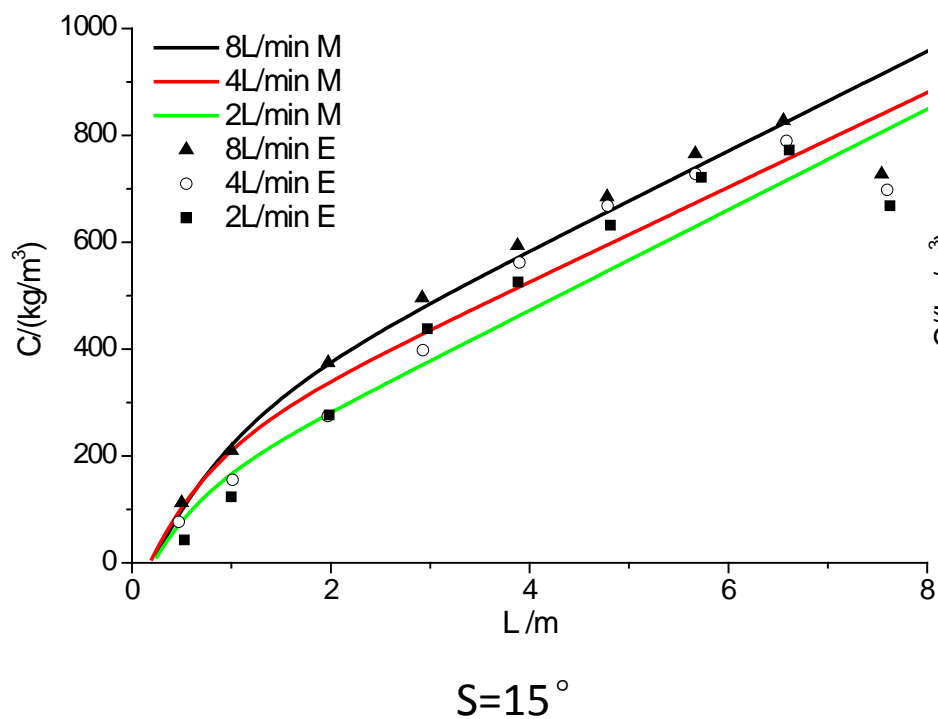
4. 数值结果和讨论

1. 细沟水流泥沙浓度的空间分布



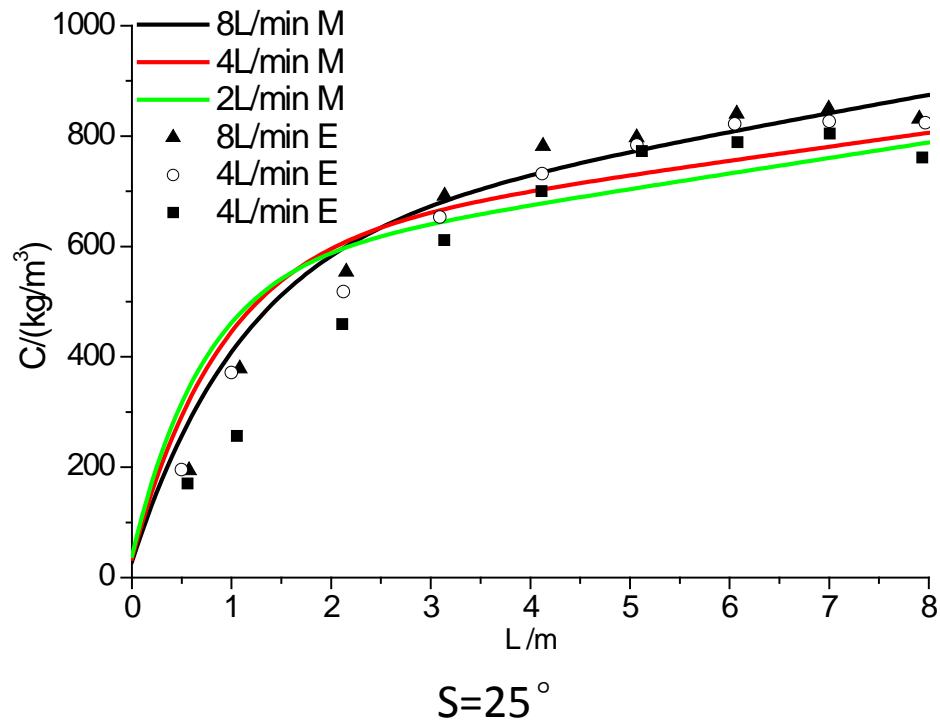
4. 数值结果和讨论

1. 细沟水流泥沙浓度的空间分布



4. 数值结果和讨论

1. 细沟水流泥沙浓度的空间分布



4. 数值结果和讨论

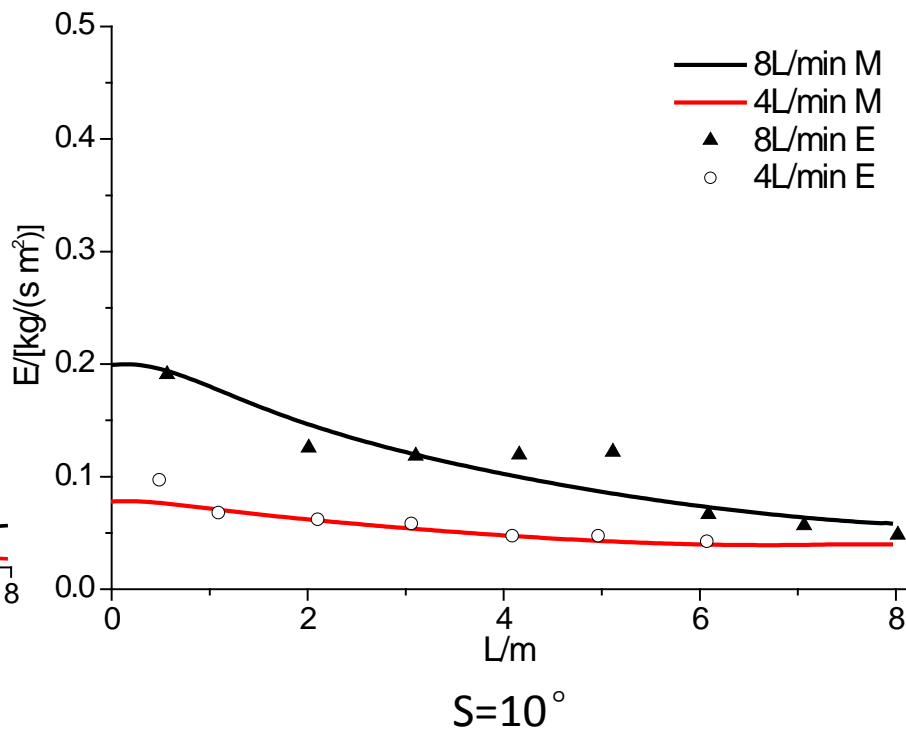
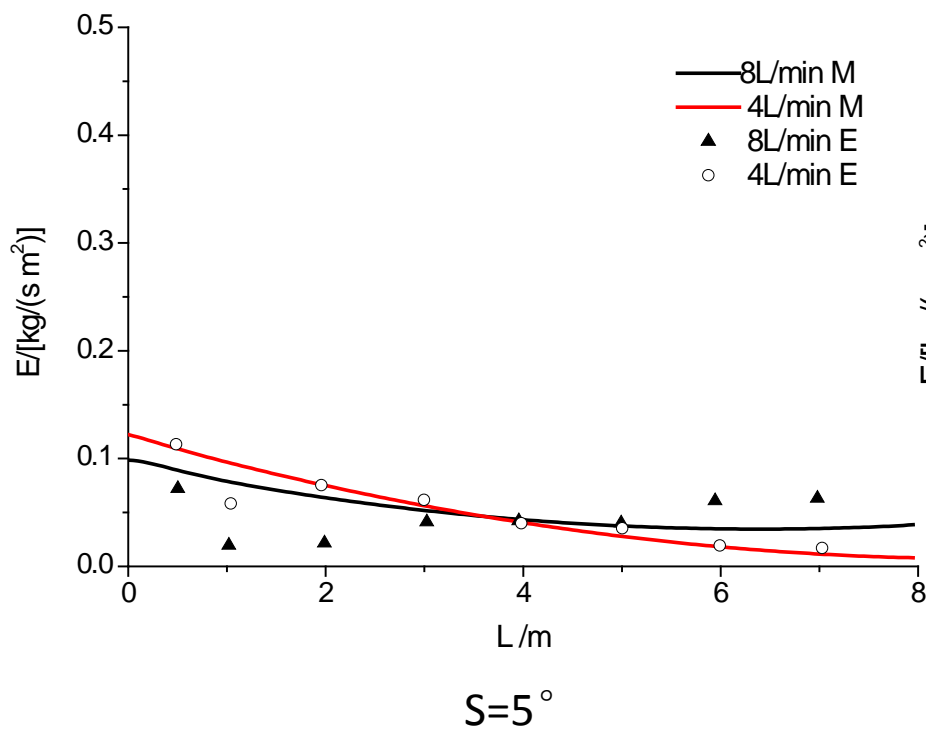
2. 细沟水流泥沙浓度空间分布的讨论

- I. 随着坡长的增加，细沟内泥沙浓度在增加，增加幅度在减小
- II. 同样坡度条件下，不同流量之间的浓度分布差异较小
- III. 同等流量条件下，不同坡度浓度大小差异较大，浓度分布有一定差别

在本实验条件下，相比流量坡度对泥沙浓度影响更大

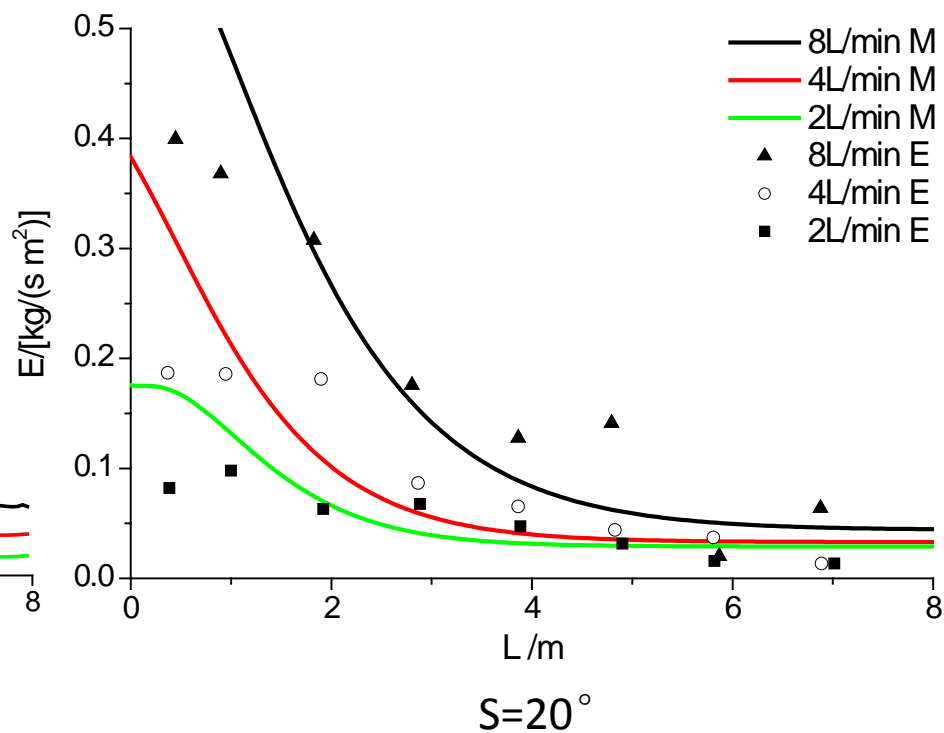
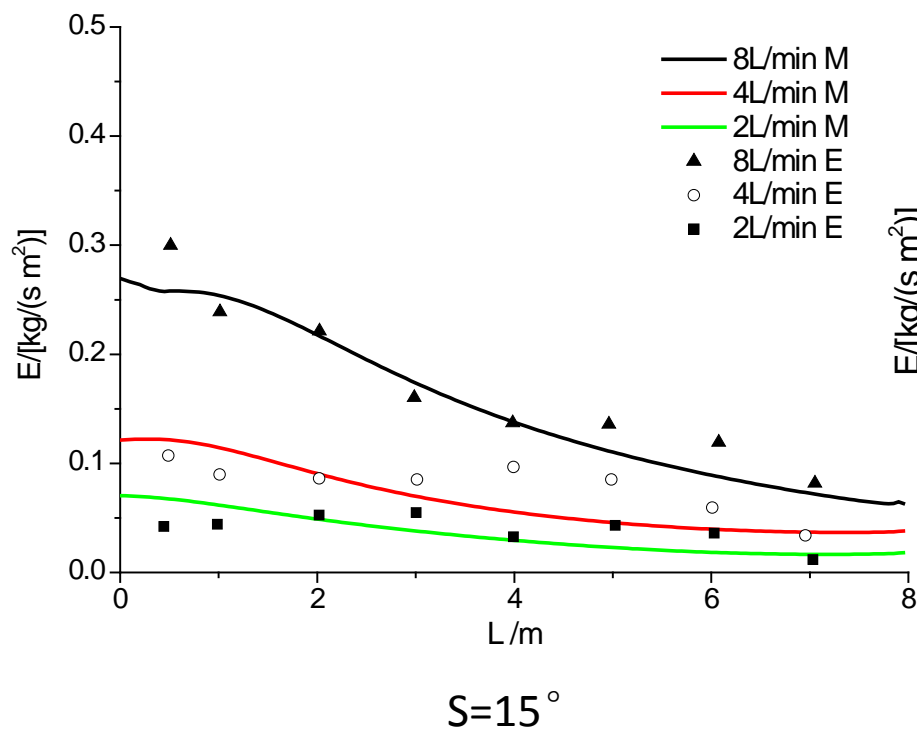
4. 数值结果和讨论

3. 细沟剥蚀率的空间分布



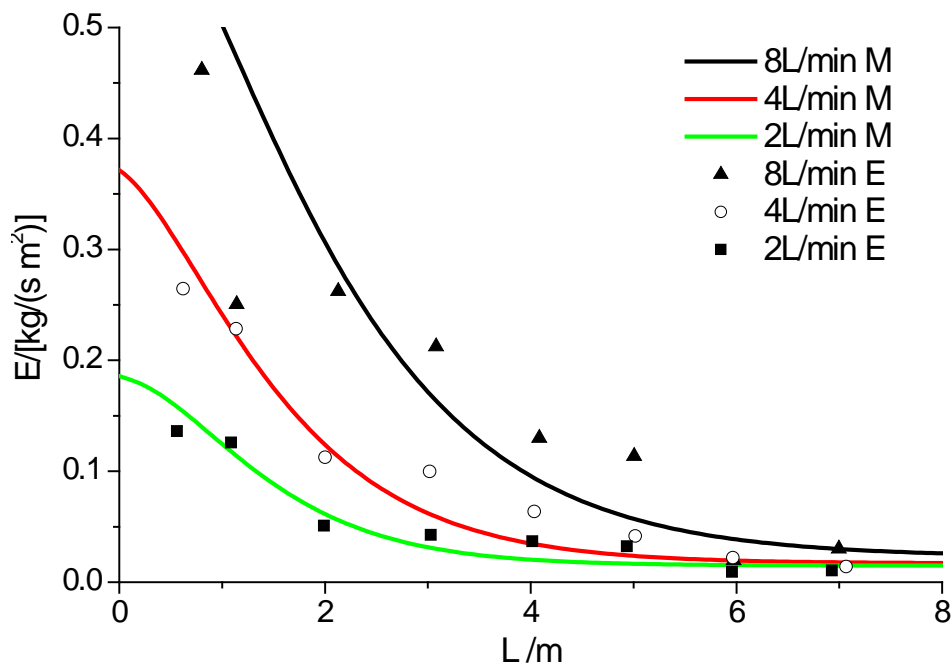
4. 数值结果和讨论

3. 细沟剥蚀率的空间分布



4. 数值结果和讨论

3. 细沟剥蚀率的空间分布



$S=25^\circ$

4. 数值结果和讨论

4. 细沟剥蚀率的空间分布的讨论

- I. 随着坡长的增加，细沟剥蚀率在减小，减小幅度也在减小
- II. 同样坡度条件下，不同流量之间的细沟剥蚀率差别较大
- III. 同等流量条件下，不同坡度之间的细沟剥蚀率差别也较大，随着坡度的增大，剥蚀率分布越接近于负指数分布

在本实验条件下，坡度和流量共同控制细沟剥蚀率

5. 结论

1. 坡度和流量能显著地影响细沟侵蚀的分布
2. 细沟水流泥沙浓度随坡长缓慢增加，其大小和分布随坡度变化明显，而不同流量条件下差异较小
3. 细沟水流剥蚀率随坡长增加而减小，其大小和分布与坡度、流量关系均较大
4. 细沟Re相比河流很小，有效的湍流脉动（与浓度相关）更多的集中于底部大涡区，为径流功率（ $J=S_f U$ ）所限制

谢谢！