

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.01.011

## 坡面薄层水流滚波水力参数影响因素

孟鹤<sup>1</sup>, 张宽地<sup>1,2</sup>, 王静雯<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为探明滚波的演变过程及产生机理, 采用定床阻力试验和超声波测量技术, 研究了5种糙度、5种能坡、8种单宽流量下滚波水力参数的变化规律。结果表明: 在固定断面, 波速随单宽流量增加呈幂函数关系增大, 相对波速反之, 波高与相对波高先增大后减小; 随糙度增加, 波速减小, 相对波速增大, 波高及相对波高均减小; 能坡对滚波的影响也与糙度有关, 小糙度下, 波速随能坡增加呈幂函数关系增大, 相对波速反之, 波高先增大后减小, 相对波高持续增大; 而大糙度下, 随能坡增加, 相对波速增加, 波高整体不变, 相对波高增加趋势变缓甚至有所减小。分析可知, 相对波速、相对波高考虑了平均水力参数的变化, 可以更好地反映各因素对滚波演变过程的影响。

**关键词:** 坡面流; 滚波; 相对波速; 相对波高; 演变过程

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2020)01-0102-10

坡面流既是流域水文过程中最基本的组成要素, 也是坡面土壤侵蚀问题的主要动力来源<sup>[1]</sup>。坡面流的研究主要集中在水动力学特性<sup>[2]</sup>和产沙输沙机理<sup>[3-4]</sup>方面, 而滚波作为坡面流的一种特殊水力现象, 它的发生会使水深、流速瞬时增加, 一方面使得土壤侵蚀程度加剧<sup>[5]</sup>, 另一方面使得水流水动力学特性变得更加复杂<sup>[6]</sup>。因此, 对滚波演变过程及其发生机理进行研究极其必要。

目前, 滚波方面的研究主要集中在数值模拟、理论与试验相结合两方面。在数值模拟方面, 有学者<sup>[7]</sup>通过一维浅水方程模拟周期永久滚波, 不过并没有得到相应的连续解。也有学者<sup>[8-9]</sup>用不同的运动方程以及数值格式模拟了滚波的演化。近年来, Richard-Gavrilyuk 模型被提出用来研究滚波<sup>[10]</sup>, 其结果虽能模拟周期永久性滚波, 但不能模拟自然滚波演化过程。在理论与试验相结合方面, Brock 首次通过实验室水槽对滚波现象进行重现, 并基于浅水方程得到滚波相关参数的表达式, 不过未找到方程的显式解<sup>[11]</sup>。潘成忠和上官周平<sup>[12]</sup>通过降雨试验发现滚波数随能坡的增大而增加。张宽地等<sup>[13]</sup>通过定床水槽试验对滚波各参数的演变规律进行了研究。由于测量技术手段的限制, 关于滚波试验方面的成果较少, 近年来, 也有学者<sup>[14-15]</sup>寻求在测量方法上取得突破, 朱良君等<sup>[16]</sup>将超声波技术应用到坡面流的测量中, 发现超声波测量结果满足室内侵蚀静床条件下的精度要求; 胡国芳等<sup>[17]</sup>将超声波法与测针法、染色法进行比较得出, 超声波法在测量侵蚀静床水深方面结果较好且耗时更少; 此外, 杨苗等<sup>[18]</sup>在此基础上研发了滚波特征参数测量系统, 与人工测量法比较, 此系统的距离测量值相对误差为0.23%, 变异系数为0.66%, 精确度和稳定性较高。综上所述, 在数值模拟方面, 由于试验数据的缺乏, 其研究具有较大局限性; 在理论与试验相结合方面, 由于测量技术尚未普遍引用到坡面流中, 研究成果较少。此外, 对于滚波的研究主要集中在波高、波速等绝对参数的变化, 未考虑到水流平均水力参数的变化, 并不能完全反映出滚波对水体的影响程度及其演化过程。

为了更好地探究滚波演化过程及其产生机理, 本文尝试引入相对波速、相对波高两参数来体现滚波参数

**收稿日期:** 2019-04-15; **网络出版日期:** 2019-12-06

**网络出版地址:** <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20191206.1009.022.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51579214; 41877076)

**作者简介:** 孟鹤(1995—), 男, 山东禹城人, 博士研究生, 主要从事坡面水流研究。E-mail: 15596826352@163.com

**通信作者:** 张宽地, E-mail: zhangkuandi428@126.com

对水体的影响程度,并基于超声波测量系统分析相对参数随单宽流量、能坡及糙度的变化规律,进而揭示滚波演化过程及机理,为探明薄层水流水动力学特性提供理论依据。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验水槽

试验于2018年在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验装置由供水系统、稳流系统、试验水槽和回水系统组成。其中,稳流系统包括稳流水箱、平水设施和蠕动泵;稳流水箱设置在试验水槽进口段,内部包括稳流栅,可防止进水口水流扰动的影响;平水设施为驼峰堰,堰后接试验水槽;蠕动泵调节流量范围为0~10 L/min,可调节至所需流量。试验水槽断面为宽浅矩形断面,其长宽高分别为6.5 m×0.6 m×0.2 m。试验水槽槽底为0.012 m厚度玻璃铺设,水槽两侧为0.003 m厚的有机玻璃,试验段有效长度为6 m,坡度可调范围为0~20°。图1为试验水槽简图。

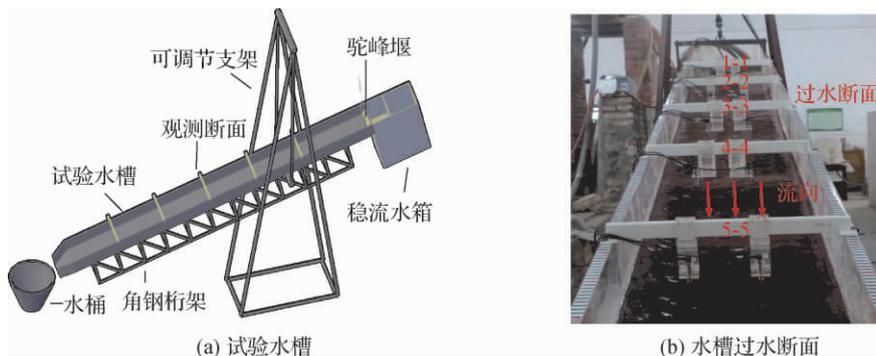


图1 试验水槽简图

Fig.1 Schematic diagram of test flume

### 1.2 试验条件

为了便于量测和控制浅层水流的边界条件,本研究采用定床阻力试验,在模拟天然表面糙度的同时也消除了床面形态变化对水流紊动的影响。本次试验直接采用糙度作为下垫面粗糙度的评价标准。为模拟陕北黄土丘陵沟壑区的实际坡面糙度,在水槽槽底铺贴与其沙粒中值粒径较为接近的180目水砂布,糙度尺寸 $k_s$ 为0.08 mm,此外,考虑到糙度对试验规律的影响,另设120目、80目、40目水砂布床面和玻璃光面,其糙度尺寸 $k_s$ 分别为0.120 mm、0.180 mm、0.380 mm、0.009 mm。考虑到实际大多数坡面的坡度范围,试验底坡设为3°、6°、9°、12°、15°,即能坡 $S$ 为0.052 3 rad、0.104 5 rad、0.156 4 rad、0.207 9 rad、0.258 8 rad;考虑到滚波可能产生的流量区间,设定单宽流量 $q$ 为0.069 4 L/(s·m)、0.138 9 L/(s·m)、0.208 3 L/(s·m)、0.277 8 L/(s·m)、0.347 2 L/(s·m)、0.416 7 L/(s·m)、0.486 1 L/(s·m)和0.555 6 L/(s·m)共8种情况。试验设置5个观测断面,为避免水槽起始断面水流不稳定给试验带来误差,将第一观测断面(1-1断面)设置在距水槽进口1.5 m处,其他依次为2-2、3-3、4-4、5-5观测断面(见图1(b)),各断面间距离为1 m。试验总历时35 d,共进行了200组次试验。

### 1.3 滚波水力参数获取及计算

本试验基于超声波测量系统对滚波进行测量。超声波测量系统主要包括超声波传感器、数据采集器和计算机终端3部分。试验时,传感器可进行一次槽底基准测量和一次水面测量,测量持续时间为30 s,水深数据采集2 000次,平均间隔时间为15 ms,得到每一测点上水深随时间的变化图,进而推算出滚波的频率 $\omega$ 、

波速  $u$  和波高  $h$  等主要特征参数。在试验中, 每个观测断面设置两组测量装置, 每组包括一前一后两个传感器, 间距为 0.05 m, 通过同一滚波经过前后两个测点的时间来计算波速; 通过水深随时间的变化图识别波峰与波谷, 进而得到波高; 频率可由单位时间内经过固定测点的滚波个数求得, 具体原理见图 2。

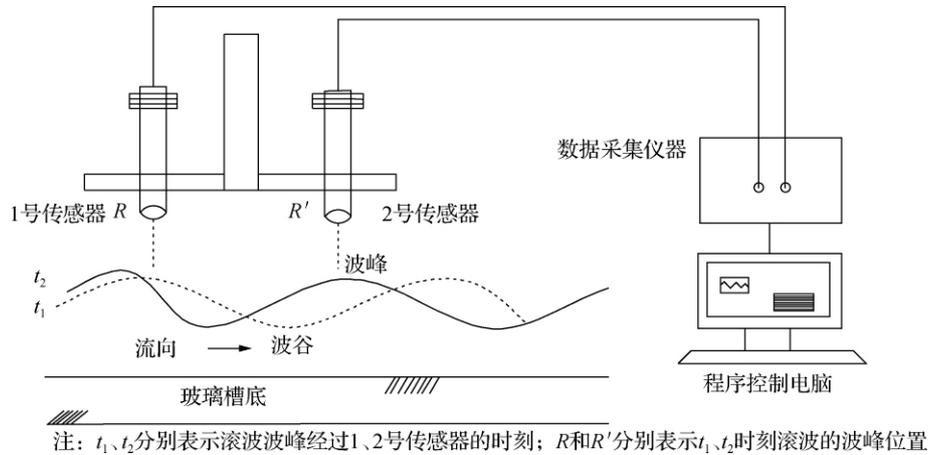


图2 超声波测量系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic measurement system

滚波水力参数主要包括频率  $\omega$ 、波速  $u$  和波高  $h$ , 计算公式为

$$\text{频率} \quad \omega = (n - 1) / (t_{\text{end}} - t_{\text{st}}) \quad (1)$$

$$\text{波速} \quad u = l / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$\text{波高} \quad h = h_2 - h_1 \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为频率, Hz;  $n$  为通过滚波的个数;  $t_{\text{end}}$  为通过固定断面最后一个波峰所对应的时刻, s;  $t_{\text{st}}$  为第一个通过固定断面波峰所对应的时刻, s;  $l$  为前后两个传感器之间的距离, m;  $t_1$ 、 $t_2$  分别为同一滚波通过前后两传感器的时间, s;  $h_2$ 、 $h_1$  分别为波峰、波谷到玻璃槽底的距离, mm。

此外, 本文采用剪切力、水流功率计算水流能量, 并且引入相对参数表征滚波对水体的影响, 计算公式为

$$\text{剪切力} \quad \tau = \rho g L S \quad (4)$$

$$\text{水流功率} \quad W = \rho g L S u \quad (5)$$

$$\text{相对波速} \quad V = u / U \quad (6)$$

$$\text{相对波高} \quad H = h / Z \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为剪切力, Pa;  $\rho$  为水的密度,  $1\,000 \text{ kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $L$  为水深, m;  $S$  为能坡, rad;  $W$  为水流功率,  $\text{W/m}^2$ ;  $V$  为相对波速;  $U$  为坡面流平均流速, m/s;  $H$  为相对波高,  $Z$  为坡面流平均水深, mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 滚波流动特征

坡面水流流动时, 水体容易失稳产生横断整个过水断面的孤立波, 该现象在水力学界被称为滚波, 滚波的发生会使水体的瞬时能量增加, 使得坡面泥沙更易起动, 导致土壤侵蚀加剧。在  $k_s = 0.080 \text{ mm}$ ,  $S = 0.0523 \text{ rad}$ ,  $q = 0.2778 \text{ L/(m} \cdot \text{s)}$  条件下, 以 4-4 断面为例,  $Z = 1.321 \text{ mm}$ ,  $U = 0.212 \text{ m/s}$ , 此时的  $\tau =$

0.678 Pa,  $W = 0.144 \text{ W/m}^2$ ; 滚波发生时, 固定断面的水体瞬时能量不断变化, 若按其瞬时能量最大值计算, 其  $h_2$  为 1.707 mm,  $u$  为 0.417 m/s,  $\tau$  为 0.876 Pa,  $W$  为  $0.365 \text{ W/m}^2$ ; 后者剪切力增幅为 1.3 倍, 水流功率增幅为 2.5 倍。由此可见滚波对水体的影响, 其流动特征见图 3。

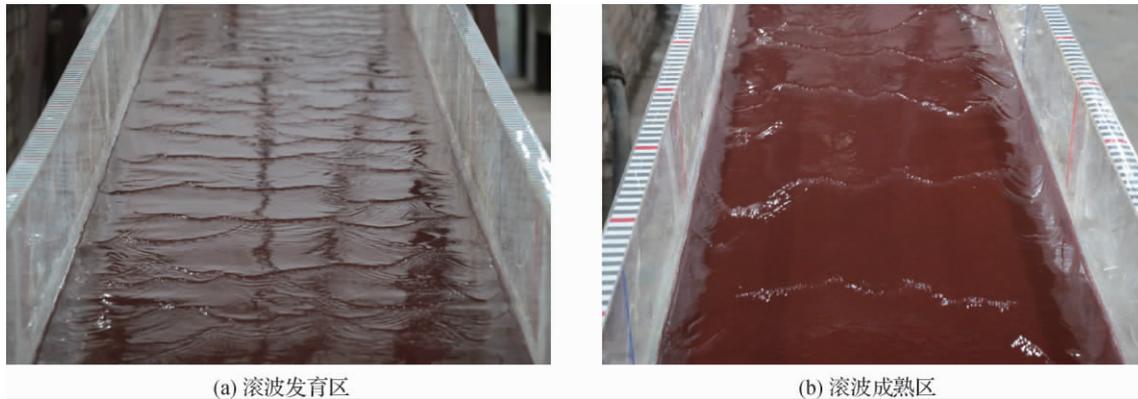


图 3  $k_s = 0.08 \text{ mm}$  条件下滚波现象

Fig. 3 Roll waves phenomenon under  $k_s = 0.08 \text{ mm}$  condition

观察图 3 可知, 随着水流失稳的出现, 波动无法衰减且不断粗化, 在发育阶段, 波形较小且不规则, 随着流程长度的增加, 波形更加清晰, 波长逐渐增大, 滚波愈加明显, 水流表面非恒定特征凸显。此外, 在试验中观察可知, 滚波的起始发育位置亦随试验条件的改变而改变。为了更好地分析滚波的发育特征, 图 4 给出了  $k_s = 0.009 \text{ mm}$ 、 $S = 0.0523 \text{ rad}$ 、 $q = 0.2788 \text{ L/(m} \cdot \text{s)}$  条件下沿水槽断面波形的变化特征。可以看出, 随着流程长度的增加, 其水深的平均值基本持平。但波形变化较为明显, 随流程增加, 波高增加, 波长变长, 波前逐渐陡峭, 波后趋于平缓, 滚波发育趋于成熟。

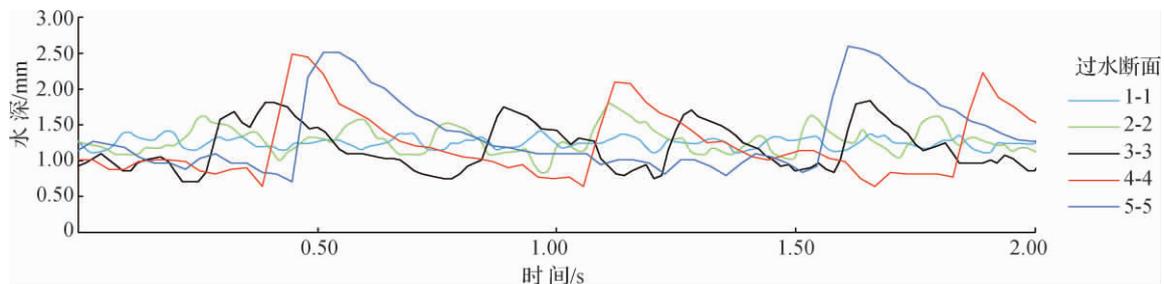


图 4 波形沿程变化

Fig. 4 Waveform changes along the path

滚波的演变过程不仅受沿程影响, 而且随单宽流量、糙度和能坡的变化而变化。由图 4 可知, 4-4、5-5 断面的滚波较为成熟, 波形明显且较为稳定, 为减少沿程变化对滚波的影响, 本文将观察断面设定为 5-5 断面。为了更好地分析滚波的变化规律, 下文对各因素影响下的频率、波速与相对波速、波高与相对波高的变化规律进行探究, 以探明滚波的演变规律及产生机理。

## 2.2 频率变化关系

滚波频率表征单位时间通过固定断面滚波的个数, 其变化规律可以间接反映滚波的聚合特征, 同时, 频率意味着单位时间内对床面表层冲击次数, 其值越大, 水体对土壤的侵蚀作用也越强。表 1 给出了  $S = 0.0523 \text{ rad}$  时, 5-5 观察断面下不同糙度、单宽流量条件下的频率值。

表 1 不同糙度、单宽流量条件下的频率值  
 Table 1 Frequency of roll waves under different roughness and unit discharge

Hz

单宽流量/ ( $L \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )	糙度				
	0.009 mm	0.080 mm	0.120 mm	0.180 mm	0.380 mm
0.069 4	0.701	0.895	0.927	0.976	1.116
0.138 9	0.715	0.922	0.991	1.093	1.284
0.208 3	0.904	1.006	1.060	1.141	1.373
0.277 8	0.996	1.029	1.143	1.313	1.510
0.347 2	1.139	1.140	1.364	1.701	1.607
0.486 1	1.290	1.425	2.025	2.925	1.951
0.555 6	2.335	2.615	2.772	4.265	2.006

由表 1 可知, 频率随单宽流量的增加而增加, 且与小流量相比, 大流量下, 频率增长速率较快。在  $S = 0.0523 \text{ rad}$ 、 $k_s = 0.009 \text{ mm}$  条件下, 当单宽流量从  $0.0694 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  增加到  $0.2083 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  时, 频率增加值为  $0.203 \text{ Hz}$ ; 当单宽流量从  $0.3472 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  增加到  $0.5556 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  时, 频率增加值为  $1.196 \text{ Hz}$ ; 后者是前者的 5.9 倍。究其原因, 这可能是单宽流量的增加导致水流驱动力增加, 使得滚波发育位置远离进水口, 经过 5-5 断面的滚波也逐渐从成熟段变化至滚波发育段, 此时的滚波波长较短, 频率较高。此外, 由滚波初始增加频率较缓可知, 滚波成熟段较为稳定, 无明显的聚合现象。

此外, 滚波频率随糙度的增加而增加。在  $S = 0.0523 \text{ rad}$ 、 $q = 0.2778 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  条件下,  $k_s = 0.009 \text{ mm}$  时, 频率为  $0.996 \text{ Hz}$ ;  $k_s = 0.120 \text{ mm}$  时, 频率为  $1.143 \text{ Hz}$ ;  $k_s = 0.380 \text{ mm}$  时, 频率为  $1.510 \text{ Hz}$ 。究其原因, 一方面, 这可能是糙度的增加使得阻力增加, 从而水体趋于稳定, 滚波发育较为不成熟, 其频率较高; 另一方面, 由图 4 可知, 滚波发育位置与沿程有关, 糙度的增加使得水体在较长的沿程后才逐渐失稳, 致使滚波发生位置后移, 使得固定位置滚波由成熟区趋于发育区, 频率较高。

表 2 给出了  $q = 0.0694 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  时, 不同糙度、能坡条件下的频率值。由表 2 可知, 频率随能坡的增加而增加。在  $q = 0.0694 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $k_s = 0.009 \text{ mm}$  条件下, 能坡从  $0.0523 \text{ rad}$  增加到  $0.2588 \text{ rad}$  时, 频率从  $0.701 \text{ Hz}$  增加到  $1.887 \text{ Hz}$ 。究其原因, 这可能是能坡较大时, 重力沿水流流向的分力增加, 一方面水流流速增加, 阻力变化关系到达阻力平方区, 导致阻力增加, 水体受力趋于平衡, 滚波发育程度变弱, 另一方面, 水流受到的驱动力增强, 滚波发生区后移, 最终导致频率增加。

表 2 不同糙度、能坡条件下的滚波频率  
 Table 2 Frequency of roll waves under different roughness and energy slope

Hz

糙度/ mm	能坡				
	0.0523 rad	0.1045 rad	0.1564 rad	0.2079 rad	0.2588 rad
0.009	0.701	0.924	1.295	1.511	1.887
0.080	0.895	1.024	1.271	1.363	1.718
0.120	0.927	1.104	1.333	1.446	1.858
0.180	0.976	1.224	1.426	1.570	2.068
0.380	1.116	1.624	1.737	1.984	2.350

### 2.3 波速与相对波速

随能坡和单宽流量的改变, 坡面流平均流速及波速均发生变化, 只对波速进行分析并不能完全反映出滚波对水体的影响, 因此引入相对波速这一参数进行分析。图 5 给出了不同糙度条件下, 波速、相对波速随能坡和单宽流量的变化图。

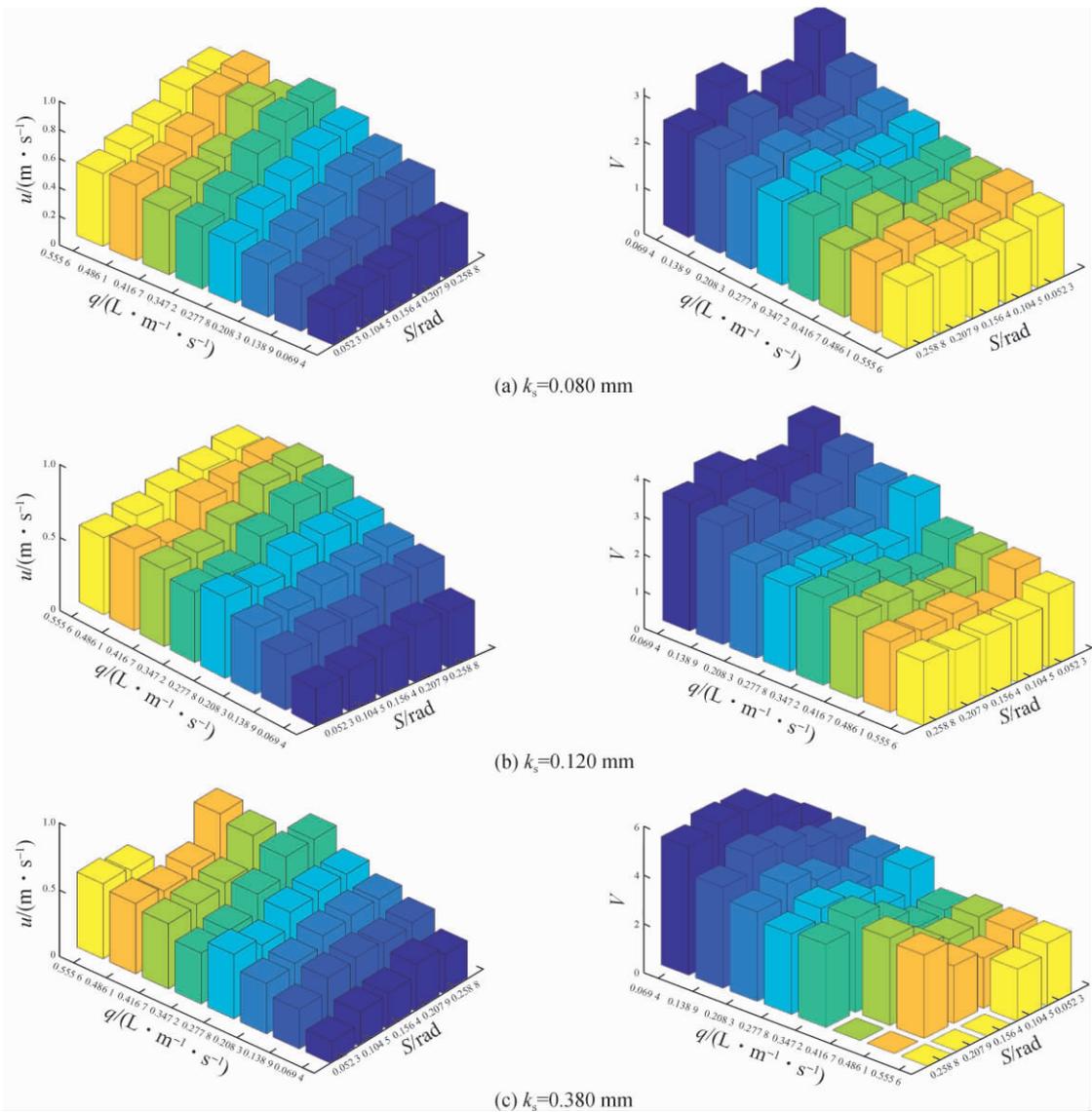


图 5 滚波波速、相对波速随能坡和单宽流量的变化关系

Fig. 5 Relationship diagram of rolling wave velocity and relative wave velocity with energy slope and unit discharge

由图 5 可知, 波速随单宽流量的增加呈幂函数规律增加, 相对波速与之相反。在  $k_s = 0.080$  mm、 $S = 0.0523$  rad 条件下, 当单宽流量从  $0.0694$  L/(s·m) 增加到  $0.5556$  L/(s·m) 时, 波速从  $0.251$  m/s 增加到  $0.504$  m/s, 其关系为  $u = 0.631 q^{0.349}$ ,  $R^2 = 0.983$ ; 而当单宽流量从  $0.0694$  L/(s·m) 增加到  $0.5556$  L/(s·m) 时, 相对波速从  $3.16$  减少到  $1.54$ , 其关系为  $V = 1.256 q^{-0.342}$ ,  $R^2 = 0.981$ 。通过分析可知, 与平均流速相比, 波速的增加速率较小, 即单宽流量的增加在实质上降低了波速对水体的影响。究其原因, 这可能是流量较小时, 单宽流量增加导致水深增加, 黏滞力和表面张力作用减弱, 重力的作用相对增强, 致使平均流速及波速增加, 同时小流量下的黏性底层厚度较大, 而主流区范围较小, 致使平均流速增加效果明显; 大流量条件下, 水流流速较大, 致使阻力变化关系迅速过渡到阻力平方区, 阻力增加, 水体趋于平衡, 滚波现象减弱, 波速接近于平均流速, 相对波速趋近于 1。

此外, 波速随下垫面糙度的增加而减少, 相对波速反之, 在  $S = 0.1045$  rad、 $q = 0.2083$  L/(s·m) 工况下, 糙度从  $0.009$  mm 增加到  $0.120$  mm 时, 其波速从  $0.561$  m/s 减少到  $0.452$  m/s, 相对波速从  $1.75$  增加到  $2.30$ 。即下垫面糙度对平均流速的抑制作用超过对波速的抑制作用, 这意味着滚波对水体的影响程度增强。

究其原因,这可能是糙度越大,下垫面阻力越大,水体失稳强度减弱,波速较小,而平均流速受下垫面影响更甚,因此,相对波速较大。

随能坡的增加,波速总体呈幂函数规律增加。而相对波速随能坡的变化规律与糙度密切相关,糙度较小时,相对波速随能坡的增加逐渐减少,当糙度过渡到大糙度条件时,相对波速随能坡的增加过渡到逐渐增加的趋势。在  $q=0.0694 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{s})$  条件下,  $S=0.0523 \text{ rad}$  变化到  $S=0.2588 \text{ rad}$  时,以  $k_s=0.380 \text{ mm}$  为界,小糙度下,  $k_s=0.009 \text{ mm}$  时,相对波速从 3.15 减少到 2.27;  $k_s=0.120 \text{ mm}$  时,相对波速从 3.88 减少到 3.41; 大糙度下,  $k_s=0.380 \text{ mm}$  时,相对波速从 3.67 增加到 5.23。究其原因,这可能是由于随能坡的增加,重力沿水流方向的分力增加,致使波速及平均流速整体呈增加趋势,然而随糙度增加,下垫面阻力增加,致使平均流速增加趋势减缓,而波速随能坡的增加而增加,最终使得相对波速的变化规律发生改变。

## 2.4 波高与相对波高

对于波能沿程损失的计算,不仅涉及到波速,而且还会涉及到波高。因此,研究滚波波高的变化规律对探明波能流运动机理有着重要的意义。此外,滚波波高与坡面流平均水深息息相关,忽略掉平均水深的变化而单独研究波高,并不能完全体现滚波发生时水体的紊乱程度。因此,图6给出了波高  $h$ 、相对波高  $H$  随单宽流量和能坡的变化关系图。

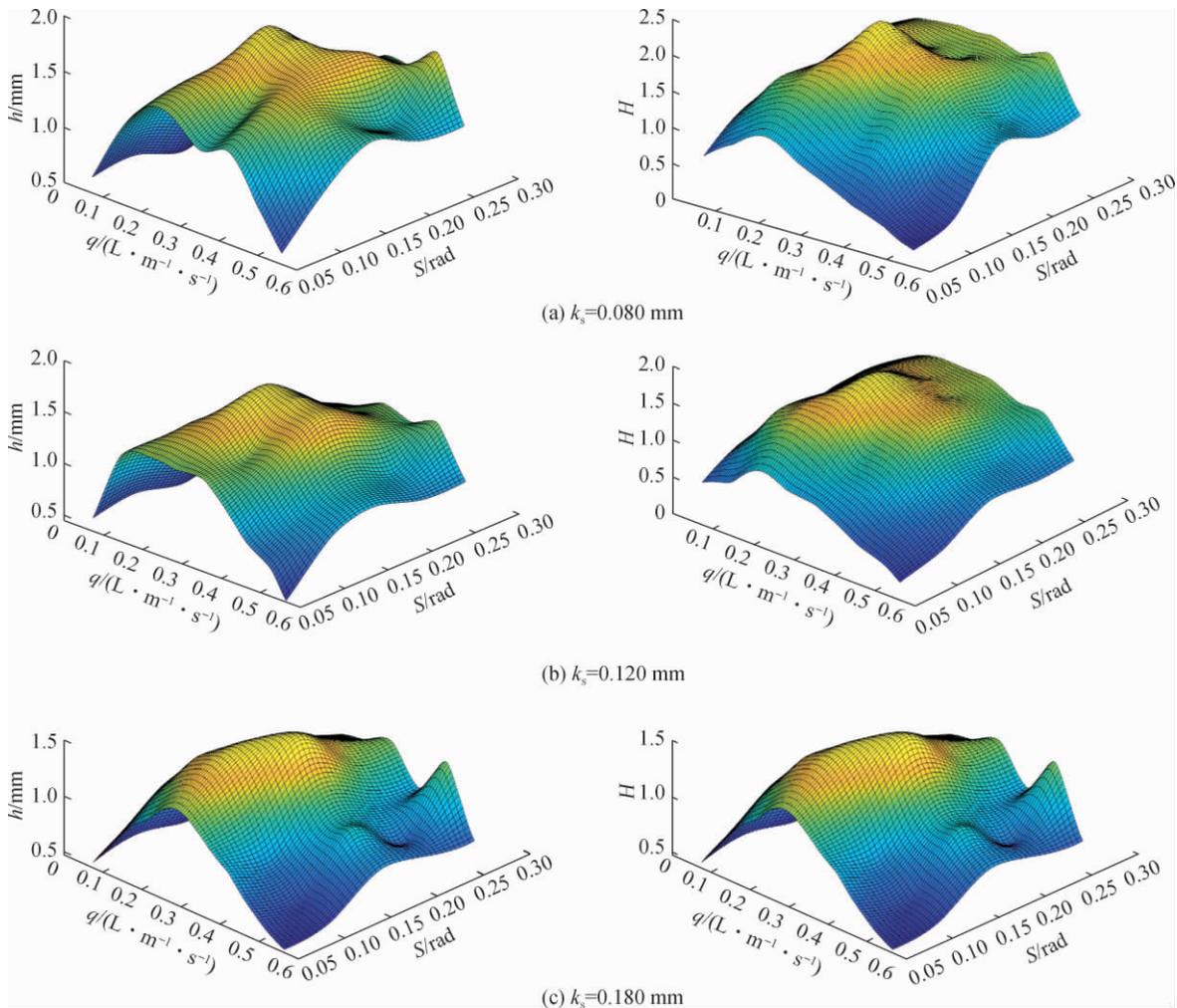


图6 滚波波高、相对波高随单宽流量和能坡的变化关系

Fig. 6 Relationship diagram between roll waves height and relative wave height with unit discharge and energy slope

由图6可知,随着单宽流量的增加,波高及相对波高皆先增大后减小,且滚波消失时,相对波高趋近于0。从波高与相对波高的角度来看,这意味着滚波对水体的影响先增强后减弱。结合图4可知,波高随沿程不断增加,而受水流驱动力影响,在固定断面滚波从成熟区过渡到发育区,成熟区波高、相对波高随单宽流量的增加,滚波现象增强;而在发育区,水体较为稳定,滚波影响程度较弱,波高、相对波高较小,结合二者分析可知,单宽流量的增加实质上促进波高的发育。结合频率、相对波速和相对波高的变化规律可知,单宽流量的增加一方面促使滚波发生、发育位置向出水口方向的推移,另一方面,从滚波对水体的影响程度上来讲,单宽流量的增加抑制了波速的增加速率,增加了波高的增加速率。

由图6可知,粗糙度越大,波高及相对波高越小。由此可见,糙度的增加对滚波的发育起抑制作用。究其原因,这可能是由于糙度的增加,阻力随之增加,致使平均流速减小,从而水深增加,导致水体失稳程度逐渐降低,滚波波高逐渐降低,而平均水深增加,最终导致相对波高逐渐降低。结合频率、相对波速和相对波高的变化规律可知,糙度的增加一方面促使着滚波发生、发育位置的推移,另一方面,从滚波对水体的影响程度上来讲,糙度的增加加大了波速对水体的影响程度,减弱了波高对水体的影响。

此外,波高随能坡的变化规律受糙度影响较大。小糙度条件下,波高随能坡的增加先增大后减小,大糙度条件下,波高整体维持在一定范围内,且数值整体偏低。而相对波高随能坡的变化规律亦受糙度的影响,小糙度条件下,随能坡增加,相对波高增加速率逐渐变缓;大糙度条件下,相对波高增加趋势变缓甚至出现减少的趋势。在 $S=0.1564\text{ rad}$ 、 $q=0.2778\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 条件下,以 $k_s=0.380\text{ mm}$ 为界,小糙度下, $k_s=0.009\text{ mm}$ 时,相对波高从1.16增加到2.59; $k_s=0.120\text{ mm}$ 时,相对波高从0.89增加到1.86;大糙度下, $k_s=0.380\text{ mm}$ 时,相对波高从0.73减少到0.59。究其原因,这可能是小糙度条件下,随能坡的增加,阻力变化关系逐渐到达阻力平方区,水流紊乱程度先增强后减弱,波高先增大后减小,与此同时,水流平均流速增加,导致平均水深减少,因此相对波高的增加速率逐渐降低;大糙度条件下,滚波波高趋于稳定,而下垫面阻力较大,重力沿水流流向分力与下垫面阻力相抵消,随能坡增加,平均水深减少趋势较为平缓,所以相对波高增加趋势减缓。

结合频率、相对波速和相对波高的变化规律可知,能坡的增加一方面促使滚波发生、发育位置的推移,另一方面,从滚波对水体的影响程度上来讲,小糙度条件下,能坡的增加减弱了波速对水体的影响,加大了波高对水体的影响,大糙度条件下,能坡的增加加强了波速对水体的影响,而在波高方面,能坡的影响不大。这也从侧面说明了糙度和能坡互相影响,共同作用于滚波的发育与演变。究其原因,这可能是能坡的大小和下垫面糙度的大小影响水流流动阻力,而阻力过大时,水体趋于平衡,滚波消失。Longo<sup>[19]</sup>、Smith等<sup>[20]</sup>和Wang等<sup>[21]</sup>通过试验发现,只有水流阻力小于一定临界值时滚波才会发生,这与本试验的研究结果一致。

### 3 结 论

(1) 单宽流量的增加促进滚波的发育,主要体现在波高方面,促使波高增长速率加快,而对波速起抑制作用,减缓波速的增加速率。

(2) 糙度的增加抑制了滚波的发育,使得波速、波高降低,但从影响程度来说,糙度的增加加大了波速对水体的影响程度,减弱了波高对水体的影响,如在能坡为 $0.0523\text{ rad}$ 时,单宽流量为 $0.0694\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 条件下,糙度为 $0.009\text{ mm}$ 、 $0.080\text{ mm}$ 、 $0.120\text{ mm}$ 时,其相对波速分别为2.42、3.16、3.88,相对波高分别为1.04、0.71、0.55。

(3) 能坡对滚波的影响程度与糙度密切相关,小糙度条件下,能坡的增加减弱了波速对水体的影响,加大了波高对水体的影响,大糙度条件下,能坡的增加加强了波速对水体的影响,而在波高方面,能坡的影响不大。

(4) 与波高、波速相比,相对波速、相对波高一方面考虑到了平均水力参数的变化,因此可以更好地反映出滚波对水体的影响程度,即更客观地反映出各因素影响下水体的紊乱程度,如滚波趋于消失时,相对波

速趋近于 1, 相对波高趋近于 0; 另一方面, 可以反映出糙度、能坡之间的耦合作用, 即通过共同影响于水流流动的阻力进而影响滚波的发育。

(5) 随单宽流量、能坡及糙度的增加, 滚波频率增加, 即三者的增加对滚波的影响, 不仅体现在滚波对水体的影响程度方面, 而且会促使滚波发生位置的推移, 即滚波的发育过程是二者的叠加。

#### 参考文献:

- [1] 申红彬, 徐宗学, 张书函. 流域坡面汇流研究现状述评[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 467-475. (SHEN H B, XU Z X, ZHANG S H. Exponent change rule of power law for sediment transport in alluvial rivers [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 467-475. (in Chinese))
- [2] 孙立全, 吾淑芳, 郭慧莉, 等. 人工掏挖坡面侵蚀微地貌演化及其水力学特性分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 720-728. (SUN L Q, WU S F, GUO H L, et al. Microtopography evolution of artificial digging and analysis of hydraulic characteristics [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 720-728. (in Chinese))
- [3] 张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 151-158. (ZHANG G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 151-158. (in Chinese))
- [4] CHUNHONG Z, YIANEN G, YUEFEI H, et al. The contribution of astragalus adsurgens roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the loess plateau [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 265-273.
- [5] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 825-834. (ZHANG K D, WANG G Q, SUN X M, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 825-834. (in Chinese))
- [6] 张宽地, 王光谦, 王占礼, 等. 人工加糙床面薄层滚波流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 28-34. (ZHANG K D, WANG G Q, WANG Z L, et al. Experiments on hydraulic characteristics of roll wave for sheet flow with artificial rough bed [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 28-34. (in Chinese))
- [7] KRANENBURG C. On the evolution of roll waves [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 245: 249-261.
- [8] CHANG H C, DEMEKHIN E A, KALAJDIN E. Coherent structures, self-similarity, and universal roll wave coarsening dynamics [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(9): 2268-2278.
- [9] ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Roll waves simulation using shallow water equations and Weighted Average Flux method [J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(5): 610-622.
- [10] RICHARDAL G L, GAVERILYUKAL S L. A new model of roll waves: comparison with Brock's experiments [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 698: 374-405.
- [11] BROCK R R. Periodic permanent roll waves [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970, 96: 2565-2580.
- [12] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(6): 843-851. (PAN C Z, SHANGUAN Z P. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics [J]. Journal of basic science and engineering, 2009, 17(6): 843-851. (in Chinese))
- [13] 张宽地, 王光谦, 王占礼, 等. 人工加糙床面薄层滚波流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 28-34. (ZHANG K D, WANG G Q, WANG Z L, et al. Experiments on hydraulic characteristics of roll wave for sheet flow with artificial rough bed [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 28-34. (in Chinese))
- [14] LIU J, GOLLUB J P. Solitary wave dynamics of film flows [J]. Physics of Fluids, 1994, 6(5): 1702-1712.
- [15] MOUZA A A, VLACHOS N A, PARAS S V, et al. Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(4): 355-359.
- [16] 朱良君, 张光辉, 胡国芳, 等. 坡面流超声波水深测量系统研究[J]. 水土保持学报, 2013(1): 235-239. (ZHU L J, ZHANG G H, HU G F, et al. Study on evaluating ultrasonic measure system of overland flow depth [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013(1): 235-239. (in Chinese))
- [17] 胡国芳, 张光辉, 朱良君. 3种坡面流水深测量方法比较[J]. 水土保持通报, 2015(3): 152-156. (HU G F, ZHANG G H, ZHU L J. Comparison of three methods to measure depth of overland flow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015(3): 152-156. (in Chinese))

- [18] 杨苗, 龚家国, 张宽地, 等. 坡面水流滚波特征参数超声波自动测量系统构建与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 134-139. (YANG M, GONG J G, ZHANG K D, et al. Establishment and experiment of ultrasonic measuring system for characteristic parameters of roll waves on slope surface [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 134-139. (in Chinese))
- [19] LONGO S. Roll waves on a shallow layer of a dilatant fluid [J]. European Journal of Mechanics, 2011, 30(1): 57-67.
- [20] SMITH M W, COX N J, BRACKEN L J. Modeling depth distributions of overland flows [J]. Geomorphology, 2011, 125(3): 402-413.
- [21] WANG X K, YAN X F, ZHOU S F, et al. Longitudinal variations of hydraulic characteristics of overland flow with different roughness [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 66-74.

## Influence factors of hydraulic parameters of roll waves in overland flow\*

MENG He<sup>1</sup>, ZHANG Kuandi<sup>1,2</sup>, WANG Jingwen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering of Ministry of Education in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In ascertain the evolution process and generating mechanism of roll waves, the variation rules of hydraulic parameters of roll waves under five kinds of roughness, five different energy slopes and eight unit discharges was studied by using a fixed bed test and ultrasonic measurement technology. The results showed that at the fixed section, the wave velocity increased as a power function with increasing unit discharges, while the relative wave velocity exhibited an opposite trend. The wave height and relative wave height first increased and then decreased as unit discharges increased. With the increase of roughness, wave velocity decreased while relative wave velocity increased. However, the wave height and relative wave height both decreased with an increasing roughness. The influence of energy slope on roll waves was also related to roughness. Under a small roughness, the wave velocity increased as a power function with the increasing energy slope while the decreasing power function between relative wave velocity and energy slope was found. Wave height first increased and then decreased while the relative wave height increased continuously. However, under a large roughness, the relative wave velocity increased and the wave height remained stable during the whole process with an increasing energy slope. In contrast, although the relative wave height increased first but this trend became less obvious and the height even decreased as energy slopes increased. Therefore, taking into account the influence of average hydraulic parameters were taken into account when adopting the relative wave velocity and relative wave height, which could better reflect how various factors affected the evolution process of roll waves.

**Key words:** overland flow; roll waves; relative wave velocity; relative wave height; evolution

\* The study is supported financially by the National Natural Science Foundation of China (No.51579214; No.41877076).