doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.021

坡面薄层水流滚波演变规律试验研究

杨　苗[1]　张宽地[1]　龚家国[2]　赵　勇[2]　王　浩[2]　范　典[1]

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为探求坡面薄层水流滚波产生机理及其演化规律,采用变坡水槽试验,结合超声波测量技术,研究了 5 种坡度和 21 种单宽流量下坡面薄层水流的水力特性及失稳特征。结果表明,试验条件下,坡面水流流态指数平均值为 0.536,水流流态以紊流为主,流型为急流;特定粗糙床面条件下,随着流量的增加,水流经历失稳到滚波猝灭再到二次失稳的演变过程;滚波猝灭临界流量随着坡度的增大而逐渐减小,其临界雷诺数在 509 ~ 602 之间,临界弗汝德数在 3.29 ~ 7.39 之间;随着流程长度的增加,滚波的波速变化不大,波长和波高逐渐增大,频率逐渐减小,滚波发生沿程聚合现象;当单宽流量和坡度增大时,波速和频率均随之增大,波长变幅不大,而波高呈现先增大后减小的抛物线型变化趋势。

关键词: 坡面流; 滚波演化; 临界水力条件

中图分类号: S158.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)10-0156-08

Experiment on Evolution Law of Thin Layer Rolling Flow on Slope Surface

Yang Miao[1]　Zhang Kuandi[1]　Gong Jiaguo[2]　Zhao Yong[2]　Wang Hao[2]　Fan Dian[1]

(1. *College of Water Conservancy and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Department of Water Resources*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Based on the variable slopes flume experiment, adopting ultrasonic measurement technique, changes in hydraulic parameters of slope shallow flow were studied at five slopes and 21 unit width discharges from the viewpoint of hydraulic mechanism and stability characteristics. The results showed that the index mean value under test conditions of slope flow was 0.536, the fluid state was turbulent flow, and the flow pattern was specific jet. Under artificial roughness conditions, with the increase of discharge, the evolution of flow was from instability to roll wave quenching and loss stability. During this period, the surface of water flow was changed greatly. The critical flow rate of roll wave quenching was decreased with the increase of slope, and the quenching critical Reynolds number was varied from 509 to 602 and Froude number was varied from 3.29 to 7.39. The critical Reynolds number for unstable laminar flow was ranged from 778 to 961, and Froude number was ranged from 3.57 to 8.47. With the increase of flow length, the variation of wave celerity was small, but the wavelength and wave amplitude were increased, and the frequency was decreased, polymerization was occurred for roll waves along slope distance. When the unit width discharges and slope were increased, wave celerity and frequency were also increased, but the wavelength was changed little, and wave amplitude was changed in the form of single peak. The research results can provide theoretical basis for studying of soil erosion on the slope, and promote the extension of traditional hydraulics theory to overland flow.

Key words: overland flow; rolling wave evolution; critical hydraulic condition

收稿日期: 2016-07-19　修回日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579214、51209222)、流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题项目(2015ZY01、2015TS01)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1619)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-2014)

作者简介: 杨苗(1992—),男,博士生,主要从事坡面水流研究,E-mail: 18700944827@163.com

通信作者: 张宽地(1978—),男,副教授,博士,主要从事水工水力学及坡面水流研究,E-mail: zhangkuandi428@126.com

引言

在坡面地表径流中，当水流的惯性力大于粘滞力的平衡作用时，水流表面会失稳产生滚波，从而加快坡面水流对土壤的侵蚀速率[1]。目前，坡面流研究主要集中于水动力学特性[2-7]以及坡面产流产沙机制[8-9]，大多数研究者采用平均水力参数法对坡面水流进行规律阐述和阻力计算，但对于其沿程演变规律的研究尚显不足。同时，有关坡面水流“增阻”的机理，目前也尚无定论。而欲阐明薄层水流“增阻”现象的本质，就必须探明坡面水流特殊流动形态（滚波）的演化规律。

关于滚波演化方面的研究目前主要集中在明渠水流中，如 CORNISH[10] 最早进行了滚波的推测；DRESSLER[11] 基于浅水长波理论给出了滚波演化方程的间断性解析解；BROCK[12] 于 1969 年所做的水槽试验发现，由均匀流失稳后形成的滚波波形、波速及周期均是不断发生变化的；近年来对滚波的研究大多采用理论分析[13-15]，少数研究涉及到计算模拟和模型试验，如 CHANG 等[16]、ZANUTTIGH 等[17]用不同的运动方程和数值格式仿真了物理世界中滚波的空间演化。李侃禹等[18]运用一维水沙耦合数学模型，对床面形态起伏、冲淤厚度及含沙量沿程变化等因素对滚波形态的影响进行了研究；在试验研究方面，研究者们对滚波流区划分以及滚波演化方面进行了探讨，也取得了一些有益的成果[9,19-20]。但是由于精确观测手段的缺失，试验操作上存在较大困难，对于坡面水流失稳情况下滚波的产生机理、临界条件以及滚波水力参数演化规律的研究还有待进一步深入。

本文通过变坡定床水槽试验，采用超声波测量系统对坡面滚波流进行监测，试图揭示坡面滚波流失稳临界条件、沿程演变规律以及滚波特征水力参数随单宽流量和能坡的变化规律，为坡面土壤侵蚀研究提供理论依据。

1　试验设计

试验于 2016 年在中国水利水电科学研究院水资源与水土保持工程技术综合试验大厅进行。试验装置主要由试验水槽、蓄水池、变频泵、电磁流量计和出水池构成，其中，试验水槽断面采用矩形设计，尺寸为 11 m × 0.5 m × 0.5 m，水槽底板和侧壁均由 10 mm 厚超白玻璃构成，坡度可调范围为 0° ~ 30°。电磁流量计流量监控范围为 0 ~ 6 m^3/h，测量误差为 0.4%。试验水槽上部的出水池采用漏斗形结构，在出口处设置蜂窝状整流器，以减少上方来水波动对薄层水流过程的影响。

为了便于量测和控制浅层水流的边界条件，采用定床阻力试验，在模拟天然地表糙度的同时也消除了床面形态变化对水流紊动的影响。黄土高原陕北地区沙黄土坡面侵蚀较为严重，且处于风蚀水蚀交错区，坡面相对平整。鉴于此，本试验槽底粘贴 180 目水砂布，其粗糙度 k_s 为 0.09 mm，与该地区沙黄土中的沙粒中值粒径较为接近；片蚀及细沟侵蚀主要发生在 5° ~ 35° 坡面上，超过 25° 以后更容易发生沟蚀，本试验设计不予考虑易发生沟蚀的坡度范围，试验底坡设置为 5°、10°、15°、20°、25°，即能坡 S 为 0.087 2、0.173 6、0.258 8、0.342 0、0.422 6 rad；设计单宽流量综合考虑发生侵蚀性降雨雨强和滚波可能产生的流量范围，设定为 0.167、0.209、0.250、0.292、0.333、0.375、0.417、0.500、0.583、0.667、0.833、1.000、1.167、1.333、1.500、1.667、1.833、2.000、2.333、2.667、3.000 L/(s·m) 共 21 个处理，相应水深在 0.5 ~ 3.8 mm 之间变化；试验设 8 个观测断面，观测距离为 1 m。为避免水槽起始断面水流不稳给试验带来误差，将第 1 观测断面设在距水槽进口 1.5 m 处，依次为 2 - 2、3 - 3、4 - 4、5 - 5、6 - 6、7 - 7、8 - 8 观测断面。

图 1 为试验条件下无滚波和有滚波的薄层水流状态。采用超声波水位计测量系统对滚波进行测量，每个观测断面设置一前一后 2 个传感器，间距为 5 cm。每次试验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。滚波波高 h 为波峰水深和平均水深的差值，单位为 mm；滚波波速 v 由传感器间距和滚波经过 2 个传感器断面的时间差求得，单位为 m/s；滚波频率 f 由单位时间内通过观测断面滚波的个数确定，单位为 Hz。



(a) 无滚波　　(b) 有滚波

图 1　薄层水流状态

Fig. 1　States of thin layer flow

2　结果与分析

2.1　滚波临界条件

张宽地等[20]在水槽试验中发现，随着单宽流量的增大（即水深增大），坡面水流会出现水面失稳和滚波猝灭的现象，并将坡面薄层水流划分为层流失

稳区、过渡区和紊流失稳区 3 个流区。通过试验观察发现,小流量情况下,即单宽流量为 0.167 L/(s·m)时,坡面水流表面已发生失稳并产生滚波。随着单宽流量的增大,滚波逐渐粗化,当达到一定临界条件时,滚波消退,水面开始出现鱼鳞状波纹,波纹图形由小变大,由密变稀。当达到一定水深时,坡面滚波又重新产生,与之前的滚波相比,波速更快,波形也更粗。表 1 为不同坡度情况下各流区的临界水力参数。

表 1 临界水力参数

Tab. 1 Critical hydraulic parameters

流区	能坡 S/rad	临界水力参数				
		单宽流量/($L\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}$)	水深/mm	平均流速/($m\cdot s^{-1}$)	雷诺数 Re	弗氏数 Fr
滚波消退	0.087 2	0.779	1.79	0.436	602	3.29
	0.173 6	0.743	1.43	0.521	575	4.41
	0.258 8	0.696	1.15	0.606	560	5.72
	0.342 0	0.631	1.00	0.631	517	6.37
	0.422 6	0.619	0.90	0.692	509	7.39
紊流失稳	0.087 2	1.245	2.32	0.538	961	3.57
	0.173 6	1.195	1.94	0.616	926	4.47
	0.258 8	1.094	1.47	0.745	881	6.21
	0.342 0	1.105	1.34	0.827	905	7.23
	0.422 6	0.948	1.09	0.873	778	8.47

由表 1 可以看出,不同坡度条件下对应的失稳猝灭临界流量不同,随着坡度的增大,水流会提前进入到过渡流区和紊流失稳流区,滚波消退和紊流失稳的临界流量均随着坡度的增大而减小。此外,随着坡度的增大,过渡流区流量区间从 0.466 L/(s·m)逐渐减小至 0.329 L/(s·m),这表明可以产生滚波的流量相对范围在逐渐扩宽。究其原因可能与水流重力、粘滞力、表面张力有关,随着坡度的增大,重力沿坡面的分量增加,促使水流流速增加,流速梯度增大,内摩擦力同时增强,当惯性力与摩擦阻力达到平衡时,水流质点提前转捩,滚波逐渐消退。同时可以看出滚波消退时雷诺数在 509 ~ 602 之间,弗氏数在 3.29 ~ 7.39 之间;紊流失稳时雷诺数在 778 ~ 961 之间,弗氏数在 3.57 ~ 8.47 之间。其中,滚波消退的雷诺数平均值达到 553,与明渠水流的临界雷诺数接近,却大于文献[20]中在 40 目下垫面试验中得到的雷诺数 350。由此可知,雷诺数判数无法对坡面薄层水流流态做出判定,还应考虑下垫面的影响。根据 LIGHTHILL 等[21]的运动波理论,如果 $Fr>2$,水流发育的表面波将以动力波为主。本次试验条件下的滚波以动力波为主,水流流型已处于急变流状态。

2.2 水力关系

水流流态作为坡面薄层水流基本的水动力学特性,一直被视为坡面薄层水流的热点问题之一。张宽地等[20,22]在坡面漫流假定下,对各水力要素的关系进行了理论分析,并将式水力关系式 $h\propto q^m J^n$ 中的 m 定义为流态指数。目前已有不少学者对流态指数 m 进行了研究,大多数学者[23-27]的研究成果表明坡面水流处于紊流区时的 m 值小于明渠紊流的理论值 0.6,少数学者[9]得到的 m 值比明渠粗糙紊流区 0.6 还要大,其原因可能与含沙量影响有关。考虑到滚波的特征,本研究对坡面水流水深、单宽流量和能坡的水力关系进行分区研究,结果如表 2 所示。

表 2 不同流区拟合关系

Tab. 2 Fitting relation of different flow regions

流区	能坡/rad	单宽流量/($L\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}$)	雷诺数 Re	经验方程	决定系数 R^2
层流失稳区	0.087 2 ~ 0.422 6	0.161 1 ~ 0.668 9	121 ~ 527	$h=0.877\,2q^{0.433}J^{-0.333}$	0.976
过渡流区	0.087 2 ~ 0.422 6	0.671 1 ~ 1.195 0	559 ~ 941	$h=1.035\,6q^{0.628}J^{-0.280}$	0.995
紊流失稳区	0.087 2 ~ 0.422 6	0.828 9 ~ 3.009 4	691 ~ 2 508	$h=0.981\,2q^{0.623}J^{-0.298}$	0.989
全流区	0.087 2 ~ 0.422 6	0.161 1 ~ 3.009 4	121 ~ 2 508	$h=1.002\,0q^{0.536}J^{-0.316}$	0.975

由表 2 可知,层流失稳区流态指数 m 值为 0.443 大于明渠层流理论值 0.330,表明滚波增加了水流紊动性。过渡流区和紊流失稳区的 m 值与明渠粗糙紊流区 0.6 比较接近,其差值可认为是测量误差造成。对所有数据分析后得到 $m=0.536$,这与 NEARING 等[24]的研究成果最为接近,也佐证了坡面薄层水流流态以紊流为主的结论。

2.3 滚波沿程演变特性

滚波流作为非恒定非均匀流,深入研究其沿程演变特征对坡面输沙有着重要的理论价值。BROCK[12]于 1969 年所做的水槽试验发现,由均匀流失稳后形成的滚波波形、波速及周期在沿程均是不断发生变化的。BROCK 提出滚波的演化由 3 个阶段组成:①初始的小振幅阶段,其波周期基本不变。②过渡阶段,波周期开始增加和出现波的聚合过程。③最后阶段,此时发生显著的聚合现象,可以是小波聚合大波,也可以是大波吞并小波。此后,李建中等[28]根据试验现象也将滚波演化规律分为

3 个阶段，并指出波长与波高均随着流程的增加而增大。

图 2 为 5°底坡、0.250 L/(s·m)流量条件下沿程 3 个观测断面的水深随时间变化的关系。从图中可以看出滚波在经过 3－3 断面时尚未发育成熟，但已呈现雏形，滚波个数较多；滚波经过 5－5 断面时，周期不恒定但逐渐演化成形，开始发生滚波的聚合过程，波形逐渐变粗，较 3－3 断面波高从 0.8 mm 增加到 1.6 mm；在 7－7 断面，滚波发育更加成熟，波形更加明晰，聚合现象凸显，频率减小。

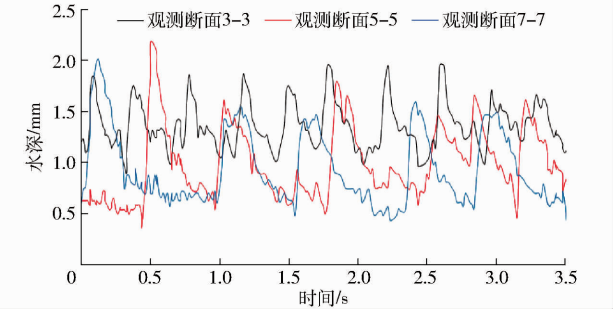

图 2　断面水深随时间的变化

Fig. 2　Changes of water depth with time

为阐明坡面滚波要素沿程变化规律，选取层流失稳区 5 个能坡下的 3－3 到 7－7 共 5 个观测断面的滚波要素进行分析。根据线性理论，可以将波动流看成是一个底部没有扰动的稳态平滑流和表面的小扰动流(表面波)叠加而成，因此滚波的波速也就是表面波的传播速度。图 3 为不同能坡下波速沿程分布。由图可看出，在整个流程范围内，波速略有波动变化，但基本保持同一个速度向前推进。分析其原因主要与滚波发育有关，流程增加，部分位能转化为动能，波速会随之增大，但是滚波的产生会使得水流阻力增加，能量耗散增大，促使波速趋于均匀化。

由试验现象可知，滚波很难在流程范围内保持稳定的周期性，而是会出现后波追及前波，大波吞并小波的现象，即滚波的聚合过程。滚波频率表示单位时间内滚波通过同一观测断面的次数，滚波聚合后，滚波的波形产生粗化，频率逐渐衰减。图 4 给出了 5 个能坡条件下频率的沿程变化规律，从图中可以看出，随着流程长度的增加，频率随之衰减，聚合作用增强，波高瞬时增高，波能增加，可以推测沿程侵蚀能力也应不断加强。此外可以发现，坡度越平缓，滚波的聚合现象发生越剧烈，滚波频率衰减速率随着坡度的增大逐渐降低，25°情况下变化幅度最小。该结果与已有研究结论[29]一致。

滚波属于浅水长波，水深比波长小的多，两者的比值远小于 1，波动会影响整个水深范围。因此，水流挟沙必须考虑波流共存的效应。滚波的波长是指相邻波峰或者波谷之间的距离，但由于滚波波谷相对平缓，故普遍定义相邻两波峰之间的距离为坡长。滚波波高指滚波波峰水深与波谷水深的差值，波高值相对平均水深较大，会使得坡面局部的水流切应力增大，因此，研究坡面薄层水流滚波波长和波高的沿程变化可为坡面挟沙机理的研究提供理论依据。图 5 和图 6 分别为不同坡度和不同单宽流量条件下，滚波波长和波高的沿程变化规律。从图中可以看出，滚波在向前推进的过程中，滚波的波长和波高会逐渐增大，但随着坡度的不同，其平均增长率也不同。床面坡度越小，滚波波长变化率越大，随着坡度的增加，波长变化率逐渐减小。例如，当 $S=0.087\ 2$ rad 时，波长的平均增长率为 0.087 5，波高的平均增长率为

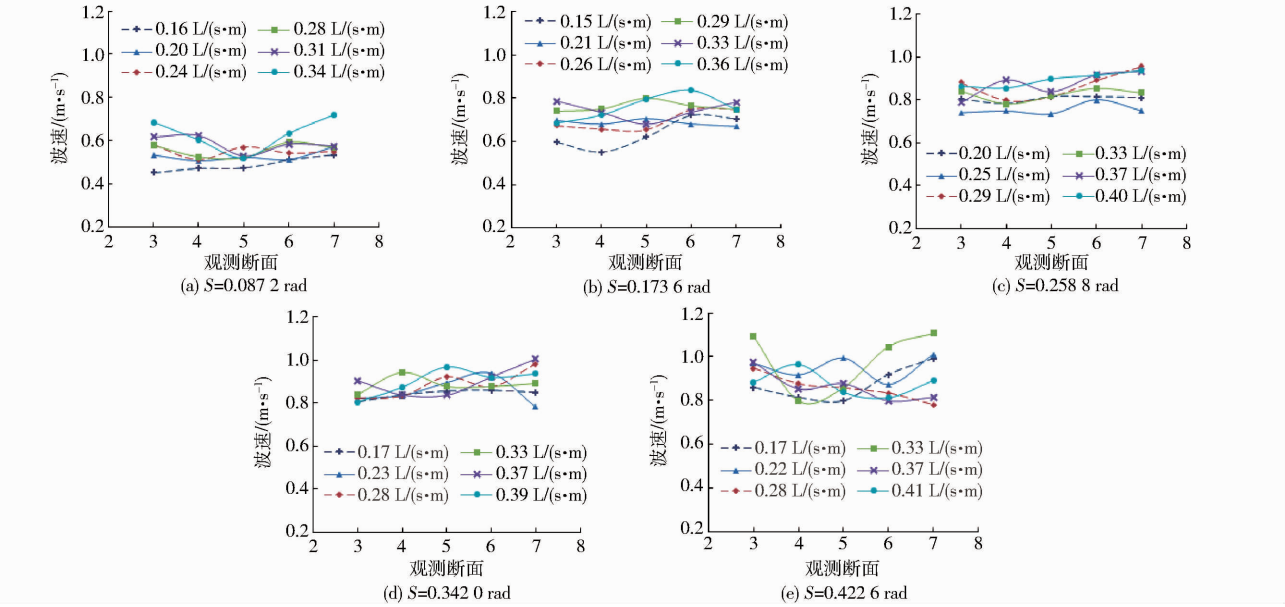

图 3　不同能坡下波速沿程分布

Fig. 3　Distributions of velocity along slope distance under different slopes

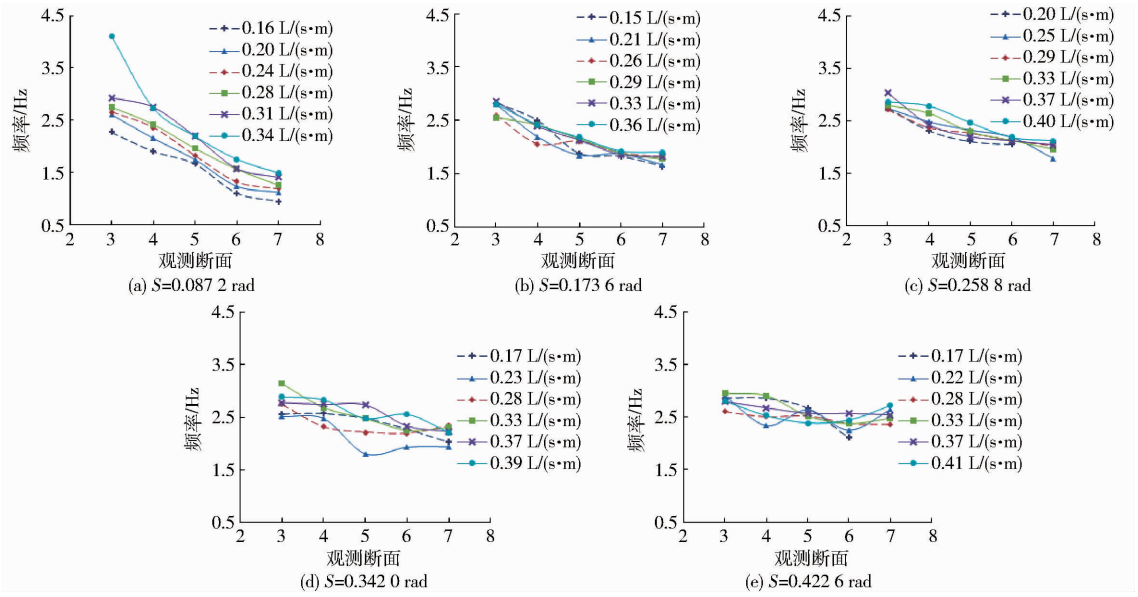

图 4 不同能坡下频率沿程分布

Fig. 4 Distributions of frequency along slope distance under different slopes

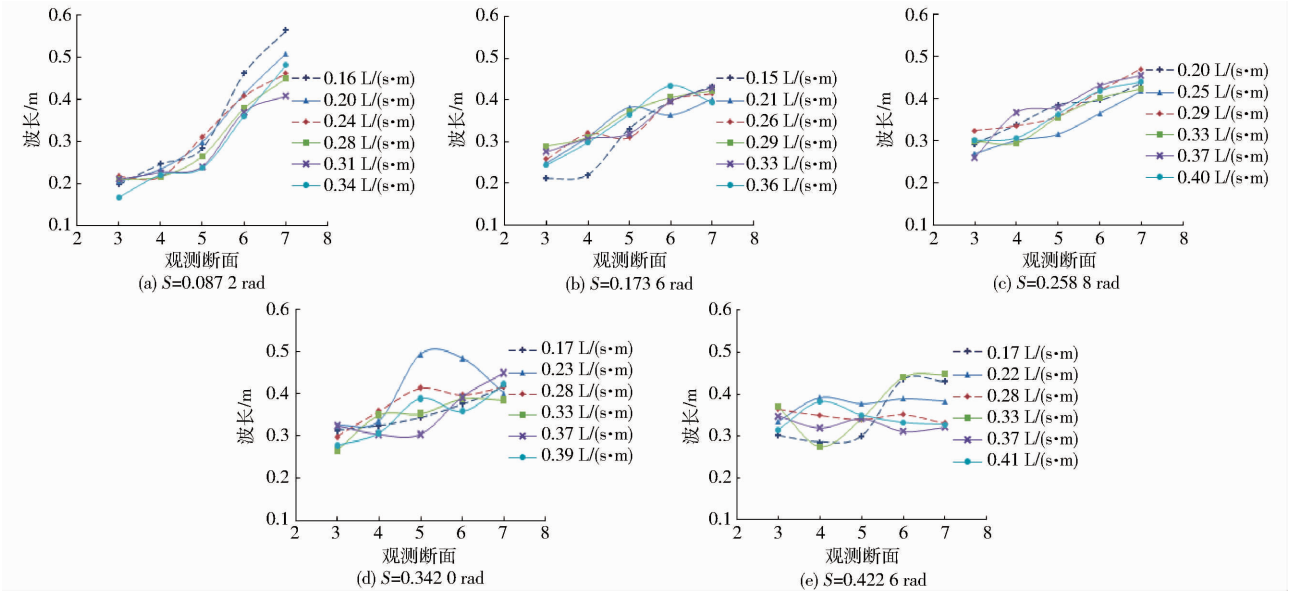

图 5 不同能坡下波长沿程分布

Fig. 5 Distributions of wavelength along slope distance under different slopes

0.200 0; S = 0.258 8 rad 时,波长的平均增长率为 0.050 0,波高的平均增长率为 0.187 5; S = 0.422 6 rad 时,波长和波高的平均增长率则接近于零。这也表明在坡度为 25°时,滚波演化基本进入演变的第 3 阶段,滚波发育成熟,波长和波高基本不发生变化。

2.4 滚波参数与流量、能坡的关系

单宽流量和坡度作为影响滚波参数的主要因素,在研究坡面侵蚀机理和滚波流输沙方面都有着重要意义。坡面流作为非恒定非均匀沿程变量流,对所有断面的滚波参数取平均值进行分析,会对试验规律的总结带来干扰,因此选取滚波发育较为完全的 7 -7 断面作为分析断面,对 5 个坡度和 6 个单宽流量下的滚波数据进行分析。

图 7 为不同坡度情况下,各滚波参数随单宽流量的变化关系。从图中可以看出,坡度一定时,随着单宽流量增大,波速和频率呈缓慢上升趋势,频率的增加速率大于波速。例如,当试验坡度为 5°时,单宽流量由 0.171 2 L/(s·m)增加到 0.379 7 L/(s·m),波速由 0.510 3 m/s 增加到 0.634 0 m/s,增幅为 0.123 7 m/s,频率由 1.10 Hz 增加到 1.76 Hz,增幅为 0.66 Hz,是波速增加速率的 2.47 倍。坡面滚波流波速的变化规律与坡面平均流速的变化规律一致,频率的变化究其原因主要与水深的变化有关,单宽流量加大使得水深加大,水流惯性力增大使得水流表面失稳的条件增强,床面粗糙度以及表面张力对其影响减弱,滚波数目增多,频率变大;随着单宽

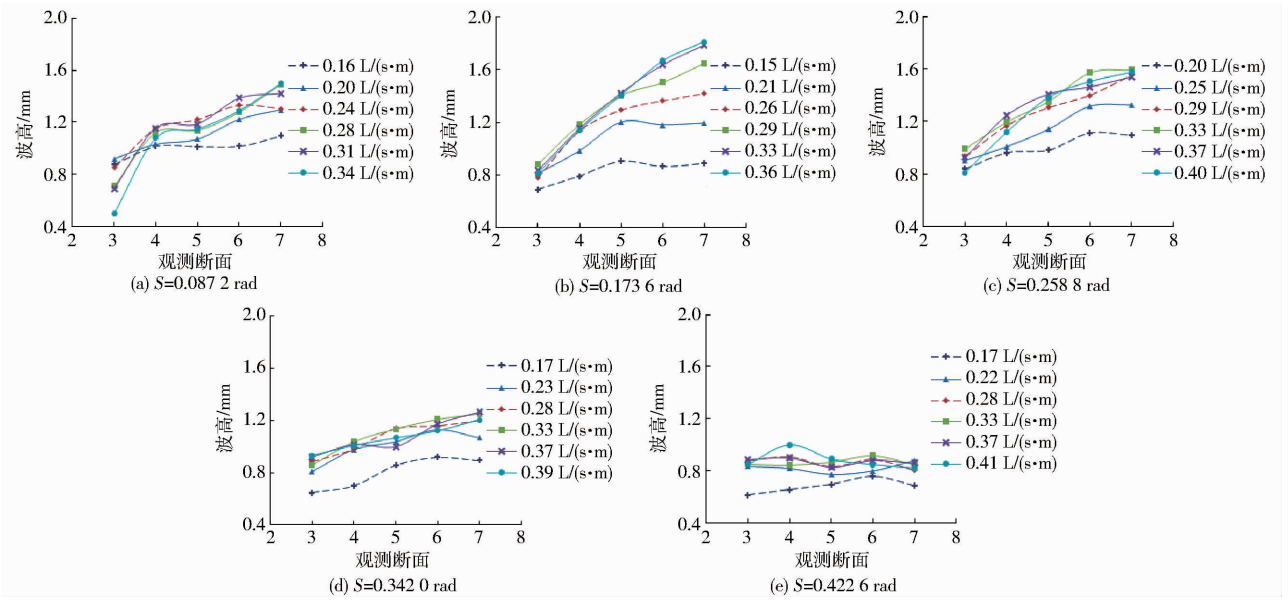

图 6　不同能坡下波高沿程分布

Fig. 6　Distributions of wave amplitude along slope distance under different slopes

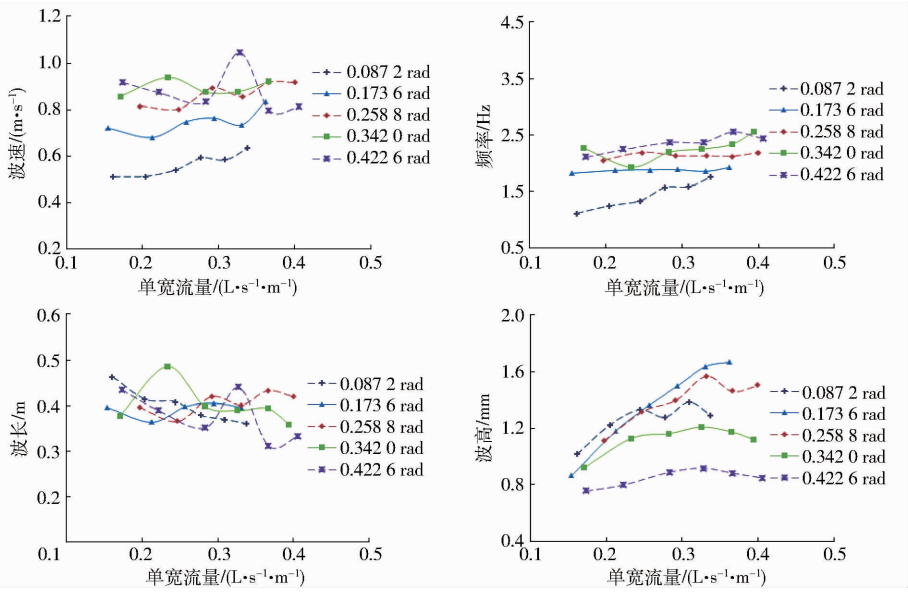

图 7　滚波参数与单宽流量的关系

Fig. 7　Relationships between rolling wave parameters and unit flow

流量的增大，波长出现上下波动，单宽流量对波长的影响不明显，ZHAO 等[1]在水槽试验中也得出波长与基本水力参数不存在显著关系的结论；随着单宽流量增大，平均水深增大，波高则呈现先增大后减小的趋势，在单宽流量为 0.34 L/(s·m)左右时达到峰值。究其原因为波速增大以后，水流的紊动达不到明渠水流紊动强度，阻力随着波速的增加达不到阻力平方区的范畴。因此，水流要达到平衡，只能促使滚波波高增大。之后随着水深的增大，水槽底部对表层水流的阻力减小，滚波失稳条件减弱，逐步趋于阻力平方区，因此，波高减小，直到滚波消失。

图 8 给出了不同单宽流量情况下，各滚波参数随能坡的变化关系。从图中可以看出，单宽流量一定时，随着能坡增大，波速逐渐增大，但增大速率逐渐减小，当能坡达到 0.342 0 rad 时，波速开始减小；能坡对滚波频率影响显著，频率随着能坡的增大而增大。例如，当流量为 0.17 L/(s·m)时，随着能坡的增大，滚波频率从 1.10 Hz 增大至 2.10 Hz。在 0.087 2 ~ 0.173 6 rad 能坡范围内增长速率最快，此后增长幅度逐渐减小。滚波数量的增多会使得坡面多处局部水头增大，从而造成水流切应力增大，冲刷作用增强，触发跌坑和细沟产生；同单宽流量一样，能坡亦对滚波波长无显著影响；随着能坡的增大，滚波波高呈现先增大后减小的趋势，其中在 0.171 2 ~ 0.311 3 L/(s·m)单宽流量范围内，波高在能坡为 0.258 8 rad 处达极大值，在 0.347 6 ~ 0.379 7 L/(s·m)

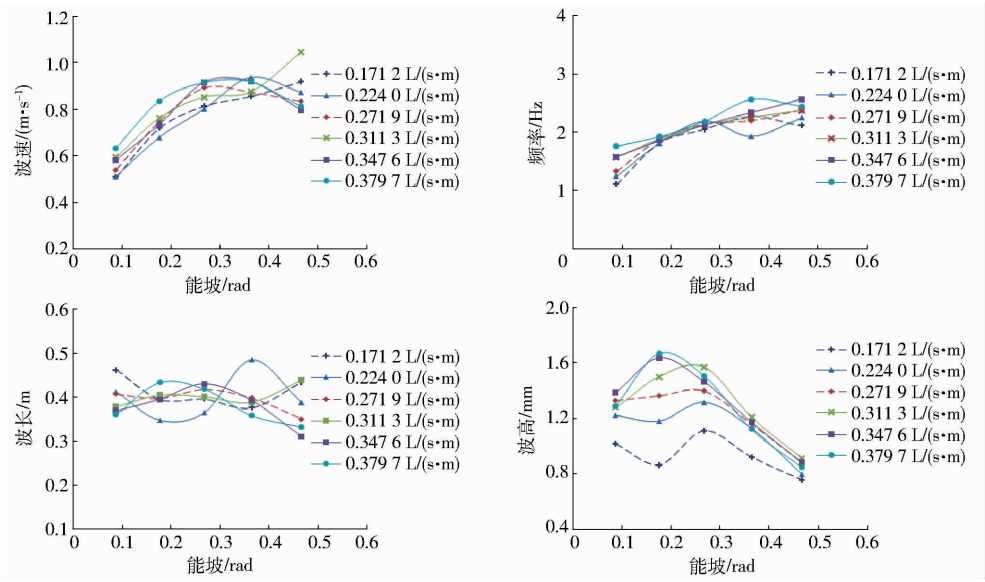

图 8 滚波参数与能坡的关系

Fig. 8 Relationships between rolling wave parameters and energy slope variation

单宽流量范围内,波高在能坡为 0.173 6 rad 处达到极大值。

3 结论

(1)单凭雷诺数判数无法对坡面薄层水流流态做出判定,还应考虑下垫面的影响。本次试验条件下,滚波消退和产生的临界流量均随着坡度的增大而减小,滚波消退时雷诺数范围为 509 ~ 602,弗氏数范围为 3.29 ~ 7.39,紊流失稳时雷诺数范围为 778 ~ 961,弗氏数范围为 3.57 ~ 8.47。

(2)坡面薄层水流滚波以动力波为主,水流流型处于急变流状态。分流区拟合的流速、单宽流量和能坡的模型关系存在差异,总体拟合模型关系中单宽流量幂指数为 0.536,水流流态以紊流为主。

(3)滚波存在沿程演变特征,在坡度和单宽流量一定的条件下,随着坡长的增大,波速变化不大,频率逐渐减小,滚波发生沿程聚合,滚波波长和波高均随之逐渐增大。

(4)随着单宽流量的增大,波速和频率均随之增大,波长存在较小幅度波动,波高呈现先增大后减小的趋势,在单宽流量为 0.34 L/(s·m)附近达到极大值;随着坡度的增大,滚波波速和频率均随之增大,波长变化不大,波高呈现先增大后减小的趋势,在 10° ~ 15°之间达到极大值。

参 考 文 献

1 ZHAO C, GAO J, ZHANG M, et al. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope [J]. CATENA, 2015, 133:394 - 402.

2 HORTON R E, LEACH H K, VAN VLIET R. Laminar sheet flow[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393 - 404.

3 EMMETT W W. Overland flow[M]//KIRKBY M J. Hillsolpe Hydrology. New York: John-Wiely and Sons, 1978:16 - 54.

4 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(3): 74 - 82.
YAO Wenyi. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow[J]. Journal of Sediment Research, 1996(3): 74 - 82. (in Chinese)

5 吴普特,周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 16 - 24.
WU Pute, ZHOU Peihua. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slope surface[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(1): 16 - 24. (in Chinese)

6 赵春红, 高建恩, 王飞,等. 阻力形式对坡面流流速修正系数的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10):130 - 135.
ZHAO Chunhong, GAO Jian'en, WANG Fei, et al. Effects of resistance forms on velocity correction factor of overland flow [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 130 - 135. (in Chinese)

7 张宽地, 王光谦, 吕宏兴,等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(2):229 - 235.
ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, LÜ Hongxing, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on hillslope under simulated rainfall[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 229 - 235. (in Chinese)

8 魏霞,李勋贵,李占斌,等. 黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 19 - 25.
WEI Xia, LI Xungui, LI Zhanbin, et al. Experiments on hydraulic characteristics of runoff in slope-gully systems in Loess Plateau

[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 19 - 25. (in Chinese)
9 李光录, 吴发启, 庞小明,等. 泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J]. 水科学进展, 2008, 19(6):868 - 874.
LI Guanglu, WU Faqi, PANG Xiaoming, et al. Relationship between sediment transport with surface rainfall and runoff energies on sloping[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6):868 - 874. (in Chinese)
10 CORNISH V. Ocean waves and kindred geophysical phenomena[M]. London:Cambridge University Press, 1934.
11 DRESSLER R F. Mathematical solution of the problem of roll waves in inclined open channels [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1949, 2(2 - 3): 149 - 194.
12 BROCK R R. Development of roll-wave trains in open channels[J]. Journal of Hydraulic Division-ASCE, 1969, 95: 1401 - 1428.
13 BALMFORTH N J, MANDRE S. Dynamics of roll waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 514: 1 - 33.
14 RICHARD G L, GAVRILYUK S L. A new model of roll waves: comparison with Brock's experiments[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 698: 374 - 405.
15 LIU Q Q. Roll waves in overland flow[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(2):110 - 117.
16 CHANG H C, DEMEKHIN F A, KALAIDIN E. Coherent structures, self-similarity, and universal roll wave coarsening dynamics [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(9): 2268 - 2278.
17 ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Roll waves simulations using shallow water equations and weighted average flux method[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(5): 610 - 622.
18 李侃禹,曹志先,谈广鸣. 可冲刷坡面滚波影响因素的数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(6): 987 - 993.
LI Kanyu, CAO Zhixian, TAN Guangmin. Factors influenced on the morphology and hydrodynamics of roll waves in overland flow over mobile bed[J]. Joumal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(6): 987 - 993. (in Chinese)
19 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, 6(6):843 - 851.
PAN Chengzhong, SHANGGUAN Zhouping. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 6(6): 843 - 851. (in Chinese)
20 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 Kuandi, WANG Guangqian, WANG Zhanli, 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)
21 LIGHTHILL M J, WHITHAM G B. On kinematic waves: I flood movement in long rivers[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955,229A:281 - 316.
22 张宽地,王光谦,孙晓敏,等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报,2014,30(15):182 - 189.
ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, SUN Xiaomin, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. Transactions of the CSAE,2014, 30(15): 182 - 189. (in Chinese)
23 GUY B T, DICKINSON W T, RUDRA R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1378 - 1386.
24 NEARING M A, SIMANTON J R, NORTON L D,et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope [J]. Earth Surface Processes and Land Forms, 1999, 24(8): 677 - 686.
25 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2):159 - 165.
ZHANG Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2): 159 - 165. (in Chinese)
26 李凤英,李琳,何小武. 坡面流水力学参数的估算[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(3):477 - 480.
LI Fengying, LI Lin, HE Xiaowu. Estimate of hydraulic parameters of overland flow [J]. Acta Agriculturae Univcrsitatis Jiangxiensis,2006, 28(3): 477 - 480. (in Chinese)
27 杨锦,吕宏兴,上官周平. 薄层水流水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4):58 - 60.
YANG Jin, LÜ Hongxing, SHANGGUAN Zhouping. Experiment study on hydraulic properties of overland flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 58 - 60. (in Chinese)
28 李建中,宁利中. 高速水力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1994.
29 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
ZHANG Kuandi. Research on hydrodynamic characteristics of slope surface flow and sediment transport mechanisms [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)