

不同覆盖度条件坡面水流阻力规律

王俊杰¹, 张宽地^{1,2}, 龚家国³, 杨帆¹, 董旭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. 中国科学院水利部水土保持研究所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; 3. 中国水利科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为探明植被覆盖条件下坡面水流阻力特性, 以流体力学和水力学基本理论为依据, 通过 6 个坡度、7 个流量和 5 种覆盖度组合条件下室内放水试验, 系统研究了植被覆盖条件下坡面水流阻力的特征。结果表明: 坡面植被水流曼宁系数随水深、雷诺数、坡度的变化与植被覆盖度密切相关, 当植被覆盖度较高时, 曼宁系数随水深、雷诺数的增加而增大, 随坡度的增加而减小; 相反, 当覆盖度较低时, 曼宁系数随水深、雷诺数的增大而减小, 坡度对曼宁系数的影响逐渐减小; 各试验工况下, 曼宁系数随弗汝德数的增大呈单调递减趋势, 增加最终都趋近于稳定值。

关键词: 植被覆盖度; 坡面流; 曼宁系数; 阻力系数

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2015)05-0001-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.05.001

Overland Flow Resistance Law Under Different Vegetation Coverage

WANG Junjie¹, ZHANG Kuandi^{1,2}, GONG Jiaguo³, YANG Fan¹, DONG Xu¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: Based on the basic theory of fluid mechanics and hydraulics, the resistance characteristics of overland flow were systematically investigated under 6 slope gradients, 7 flow discharges and 5 vegetation coverage degrees so as to explore the resistance characteristics of overland flow under different vegetation coverage. Results showed that the variances of Manning coefficient with flow depth, Reynolds number, and slope gradient were closely related to the vegetation coverage. As water depth and Reynolds number increased, the Manning coefficient increased under high vegetation coverage while showed a deceasing trend under low vegetation coverage. The influence of slope gradient on Manning coefficient gradually decreased with vegetation coverage degrees reducing. Under all test conditions, the Manning coefficient decreased with the increase of Froude number, but there was a limit of this trend. The study is of scientific significance in understanding the mechanisms of regulating slope runoff and sediment yields by vegetation.

Key words: vegetation coverage; overland flow; Manning coefficient; resistance coefficient

坡面流是一种易受地表形态、雨滴击溅、土壤类型等因素影响的流动边界复杂的浅层水流, 是土壤剥蚀、径流侵蚀、地形演变的不竭动力^[1]。沿程动量源和质量源的不断汇入, 使得这种仅仅只有几毫米甚至更浅的薄层水流在时间、空间以及流动特性上较明渠水流有很大的差异。基于存在的差异国内外许多学者纷纷对薄层水流展开了研究, 尤其是对薄层水流“增阻”现象的研究在近些年显得更加活跃。Horton^[2-3]等讨论了薄层水流的“增阻”现象, 姚文艺^[4-8]等通过试验研究确定了薄层水流的“增阻”特

性。除此之外, 为了揭示“增阻”的理论本质, 沙尔德^[9-11]等对薄层水流的“增阻”特性进行了半理论分析。目前, 对于坡面薄层水流阻力特性的研究主要停留在具有低弗汝德数、大雷诺数特性的明渠水流中^[12-13], 而对具有高弗汝德数、小雷诺数特性的植被覆盖水流的研究相对匮乏。近年来, 随着生态修复工程建设, 植被覆盖下的坡面薄层水流越来越多的被国内外学者所关注, 并在植被增阻滞流方面取了阶段性的成果: 如 Fatteta^[13-14]等通过相关领域不同方面的试验研究均证实了植被具有增加土壤抗侵蚀力、减小

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001159); 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(K318009902-1413); 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)

第一作者: 王俊杰(1990—), 男, 在读硕士, 主要从事工程水力学研究。E-mail: wangjunjie091@163.com

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

水流侵蚀力、增大水流阻力、减小流速的作用。但对于植被覆盖条件下坡面水流阻力特性方面的研究尚存在分歧,如李勉等^[15]研究表明,植被覆盖条件下平均阻力系数与流量呈负相关关系,即平均阻力随着流量的增加而减小;而王玲玲等^[16]认为,平均阻力系数与流量呈正相关关系,结论相反。由此可见,虽然关于植被覆盖条件下坡面薄层水流阻力规律的相关研究成果已多见报道,但是缺乏系统性的研究认识,存疑颇多。一方面植被的存在改变了水流的阻力特性,起到了显著的阻水减沙效果,影响了坡面的产汇流;另一方面水流改变了植被的形态,进而又影响了水流,这种相互耦合作用增加了植被阻力的复杂性,故要想精准地研究植被水流的阻力特性,就必须做更加深入而系统的研究。本文拟通过变植被覆盖度的放水冲刷试验与流体力学理论相结合的方法,对植被覆盖下的坡面薄层流的阻力特性做系统性的研究,以阐明坡面薄层水流的阻力机制,从而促进明渠阻力特性理论在植被坡面薄层水流方面的拓展。此外,这将为坡面水土流失控制、坡面薄层流“增阻”本质研究以及科学指导生态环境建设提供理论依据。

1 试验设计与方法

明渠植被水流阻力特性研究中,常采用人工模拟植被进行试验,其床面一般采用定床,该边界条件下,床面形态不会因水流条件改变而发生形态的演化,仅水流在绕过植被时,产生竖轴涡体甚至出现脱壁绕流,进而影响流速分布和流态的转换,致使水流阻力产生变化,这样可以较为精确地控制水流流动边界和量测水力要素,本研究专门设计人工模拟植被“定床”阻力试验。试验是在中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行,试验时间为 2014 年 8 月—2014 年 11 月。

根据试验目的确定以下设计要点:(1)试验采用可调坡度的有机玻璃水槽,坡度调节采用 2 个液压立柱和 1 个微调旋钮来实现,试验水槽结构尺度为长 600 cm,宽 30 cm,深 25 cm。试验选取 6 个坡度,分别为 2.0°,4.0°,6.0°,8.0°,10.0°,12.0°。(2)采用棕榈树的棕衣模拟植被特征,模拟植被最大高度为 30 mm 左右,整个试验过程以水深按不淹没水草为限制条件,水草近似按柔性植被考虑。为了模拟天然下垫面的阻力情况,水槽底部粘贴自然土壤,植被覆盖度(V_c)分别为 9.300%,6.975%,4.650%,2.325%,0.000%,每簇模拟植被均采用梅花形布置。(3)考虑到黄土高原临界侵蚀雨强为 0.50~0.60 mm/min,而最大峰值雨可达 2.40 mm/min,并尽可能使水深取值范围较大,最终设计单宽流量分别为 1.22,1.64,2.71,3.93,5.16,6.38,9.09 L/min。共 7 个试

验处理。(4)沿水槽设纵向观测断面 6 个,分别为 (0+1.5) m,(0+2.0) m,(0+2.5) m,(0+3.0) m,(0+3.5) m,(0+4.0) m。对于每个试验中的观测断面,横向随机选取了 4 个测点,采用 KMnO_4 染色示踪法进行流速测量,分别量测各试验工况下的表面优势流速 V_s 。(5)试验是通过阀门的不同组合形式来实现供水流量,供设置阀门 6 个,试验前对各阀门最大开度时的流量进行测定,试验流量变化范围选为 0~27.26 L/min。试验供水水源为容积 50 m³ 的小型水库,消除水面降落致使水泵出水波动,进而影响试验精度。提水装置由扬程为 12 m 且供水流量比较稳定的潜水泵来实现;试验稳流装置由恒定给水箱、稳流箱、稳流栅三部分组成。其中恒定水箱长 2.0 m,宽 1.0 m,高 0.5 m,箱内还设置有矩形溢流板,用以保证阀门处的作用水头恒定。为了消除进口扰动对薄层水流试验结果的影响,在试验水槽进口处设置稳流箱,其长 3.0 m,宽 2.5 m,高 2.0 m,稳流箱出口端设 2 道稳流栅。

2 水力参数计算

2.1 断面平均流速

平均流速是植被坡面水动力学要素中一个非常重要的指标,是水流强度的主要衡量指标。根据水流连续性方程,断面垂线平均流速 u 可采用实测断面平均水深 h 来求解,其计算公式为:

$$u=Q/(hb_e) \quad (1)$$

式中: u 为断面平均流速(m/s); Q 为试验流量(m³/s); h 为实测断面平均水深(m); b_e 为有效过流宽度(m), $b_e=b \times (1-V_c)$,其中 V_c 为植被覆盖度, b 为水槽宽度,本试验取 0.3 m。

2.2 水流雷诺数

水力学二元流雷诺数可表示为:

$$Re=uR/v_0 \quad (2)$$

式中: R 为水力半径(m),采用水深近似代替; v_0 为水流运动粘性系数(cm²/s),采用泊谟叶公式计算:

$$v_0=0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2) \quad (3)$$

式中: t 为水温度(°C)。

2.3 水流弗汝德数

明渠水流理论弗汝德数计算公式为:

$$Fr=u/\sqrt{gh} \quad (4)$$

2.4 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)

计算公式为:

$$f=8gRS/u^2 \quad (5)$$

式中: S 为水力坡度,近似取水槽坡度; g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。

2.5 曼宁系数(n)

计算公式为:

$$n=\frac{1}{u}R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

3 植被水流阻力特征分析

3.1 n 与 Re 的关系

Manning 糙率系数反映了床面粗糙程度对水流流动过程中的阻滞作用,一般认为植被坡面水流流动阻力主要有边界阻力或颗粒阻力、水流流经植被所产生的附加阻力。对于河道淹没植被水流中, Manning 糙率系数为一常数,不随水深、雷诺数及相对粗糙度 k_s/R 的改变而改变,而是与边界材料有关,含植被坡面薄层水流 Manning 糙率系数与雷诺数的关系比明渠植被水流的关系更复杂,其变化趋势与植被粗糙单元组成密切相关,图 1 绘制出了不同覆盖度下, Manning 糙率系数与雷诺数的变化规律,以期探明植被阻力特征。

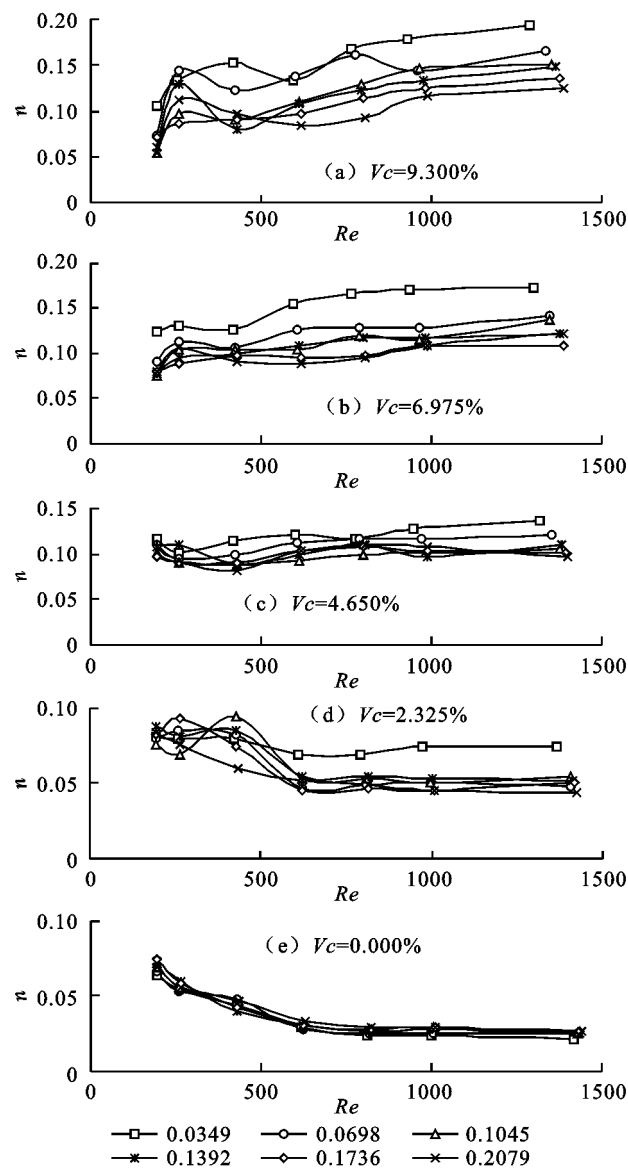


图 1 不同覆盖度条件下 Manning 系数与雷诺数的关系

由图 1 可以看出,当植被覆盖度 V_c 大于 4.650% 时,曼宁系数随着雷诺数的增加而增大,且当植被覆盖度越大时, Manning 糙率系数随雷诺数的变化率越大,即雷诺数越大,阻力的增加值越大。究其原因于植被密

度增加减小了断面过水面积,增加了植被水流的湿周,故阻力变化率越大,该工况下,植被形态阻力占据主导地位。当植被覆盖度较小时 V_c 小于 4.650%,曼宁系数随着雷诺数的增加呈现出递减关系,尤其是当坡面为裸坡时,小雷诺数阻力系数的变化比较剧烈,随着雷诺数的增加,水流逐渐转捩为阻力平方区, Manning 糙率系数趋近于常数,这与明渠阻力中颗粒阻力的特征比较相似。当 $V_c=4.650\%$ 时,曼宁系数随着雷诺数的增加变化趋于平缓,究其原因主要为该工况下,颗粒阻力减少的趋势与形态阻力增加的趋势趋于平衡。由以上分析可知,曼宁系数随着雷诺数的变化趋势与植被覆盖度密切相关,并非呈现出单调增加或单调递减的趋势。

3.2 n 与 h 的关系

由于植物的存在,加剧了植物区中流体微团的相互碰撞、掺混及动量传递,使得植物区时均流速分布较为均匀化,而不再符合对数流速分布规律^[17]。一般认为植被对水流引起的阻力沿水深作用于水体,则植被水流阻力系数与淹没度(非淹没条件为水深)呈正相关关系,为进一步分析非淹没植被坡面水流阻力系数的变化规律,将试验资料整理如图 2 所示。

图 2 为各种覆盖度工况下植被 Manning 糙率系数随水深的变化趋势。对于无植被试验工况,在水深较小时, Manning 糙率系数随着水深的增加而逐渐减小,不管是坡度如何变化,当 Manning 糙率系数减少到一定程度时,均趋近于同一个值 0.025,这与明渠水流中渠道糙率 n 值比较接近。因明渠水流一般水深在厘米级以上,因此一般取 n 值为 0.025 左右。从图 2(e)还可以看出,坡度愈大,趋近于 0.025 时的水深愈浅,这说明对于薄层水流而言,只要水深达到一定深度(本床面条件下为 2.5 mm 左右时),床面阻力系数就有可能达到明渠水流的稳定值。

由图 2(a)和图 2(b)可知,当植被覆盖度增加到 6.975%,9.300% 时,植被水流 Manning 糙率系数 n 随着水深 h 的增加呈幂函数增加的趋势,且 dn/dh 随着植被覆盖度的增加而增大。表明在高覆盖度下,当雷诺数 Re 相同,流速增幅较小,则水深必然加大,导致植被沿水深作用于水流的拖曳力迅速增加,此时壁面摩擦产生的阻力远小于植被附加阻力。这与 James 等^[24] 和唐洪武等^[12] 在植被附加阻力方面的研究结论相一致。由图 2(c)可知,当植被覆盖度为 4.650% 时, Manning 糙率系数与水深无关。如果认为无植被条件下当水深达到一定条件下(本试验在 4 mm 时),床面颗粒阻力为恒定值 0.025,则该植被覆盖度条件下,植被对水流拖曳作用造成的形态阻力为 0.075 左右。由此可知,当植被阻力超过 0.075 时,

植被的阻水作用随水深的增加而增大,植被可以达到自然修复和保护的作用。相反,当植被阻力小于 0.075 时,植被必然在一定水深条件下,产生植被破坏。

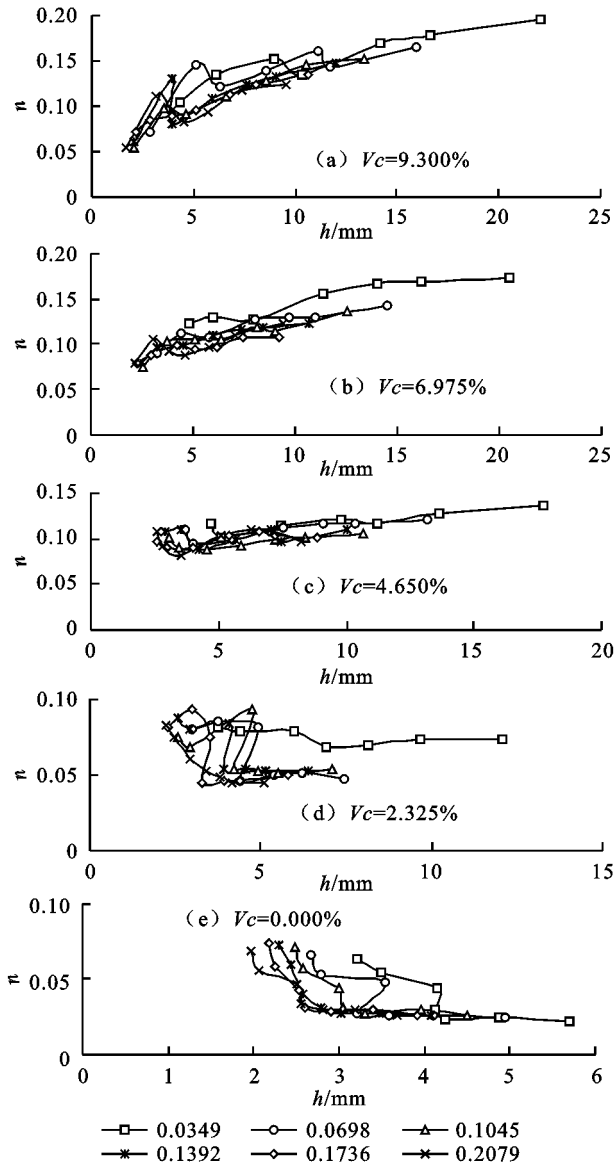


图 2 不同覆盖度条件下 Manning 系数与水深的关系

3.3 n 与 S 的关系

大多学者认为,坡面薄层水流阻力系数随坡度的增大而减小,即两者呈负相关关系^[8,10]。也有学者认为阻力系数随着坡度的增大而增大,两者呈正相关关系^[18]。为了进一步探索两者之间存在的内在联系,将试验数据整理如图 3 所示。

由图 3 分析可知:当植被覆盖度大于 4.650% 时,曼宁系数随着坡度的增加而降低,且同流量呈正相关关系;然而,当植被覆盖度小于 4.650% 时,曼宁系数随着坡度的增加趋于稳定,此时同流量呈负相关关系。当植被覆盖度等于 4.650%,曼宁系数与坡度流量都无关。当植被覆盖度大于 4.650% 时,形态阻力大于上文中提到的 0.075,占据主导作用;随着坡度的增加,水流流速增大,水深则减小,水流与植被撞

击的概率减小,因而形态阻力减小。而在相同坡度下,随着流量的增大,水深增加,与植被撞击概率增大,相应的形态阻力就会增大。当植被覆盖度小于 4.650% 时,颗粒阻力在水流阻力中起到主导作用,这与张宽地等^[11]关于“颗粒阻力不受或很少受坡度 S 的影响”的结论一致,所以曼宁系数随着坡度的增加趋于稳定,同时随着流量的增大而减小。当植被覆盖度 $V_c=2.325\%$ 时,曼宁系数不随坡度和流量改变,说明此时形态阻力的增大与颗粒阻力的减小趋势达到了一个相互制约、动态平衡的状态。

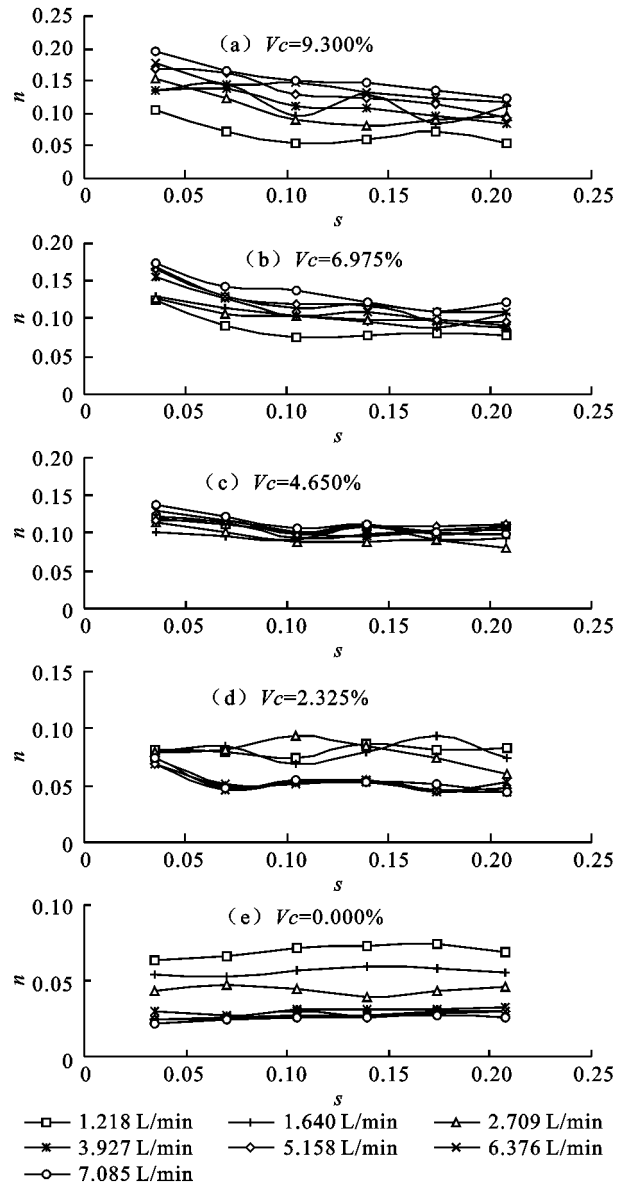


图 3 不同覆盖度条件下阻力系数与坡度的关系

3.4 n 与 Vc 的关系

文献^[10-11]均表明,植被综合糙率系数与植被覆盖度 V_c 密切相关,故本文图 4 绘制出了不同坡度下, n 与 V_c 的关系曲线。植被水流阻力系数随覆盖度的增加而增加,图 4 也验证了这一规律。

由图 4 可见,水流流动曼宁系数随覆盖度的增加

而逐渐增大,但 dn/dVc 与单宽流量(雷诺数)密切相关,当紊动强度较小时($q=1.218$), dn/dVc 较小,随单宽流量增加, n 与 Vc 的关系曲线逐渐变陡, dn/dVc 逐渐增大。同时可看出,植被水流曼宁系数与覆盖度试验点据分布区域组成了顶对顶的扇形区域,而两扇

形的顶点恰好是该植被类型时的临界覆盖度。当植被覆盖度大于临界值时,单宽流量越大,曼宁系数越大,而植被覆盖度小于临界值时,单宽流量越大,曼宁系数越小。由此可见,当植被覆盖度大于临界覆盖度时,植被对坡面固土减沙的作用则更加显著。

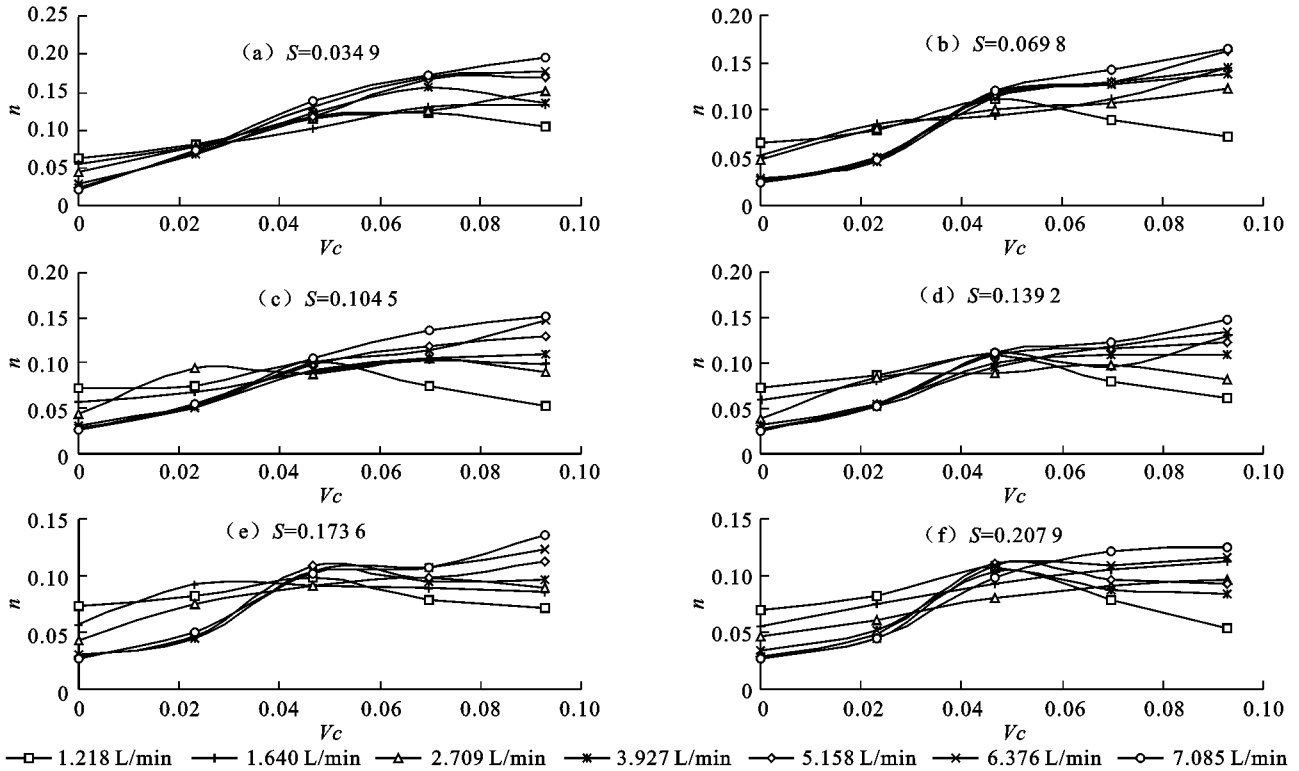


图 4 不同覆盖度条件下曼宁系数与覆盖度的关系

3.5 曼宁系数与弗汝德数的关系

曼宁系数 n 作为描述和计算坡面流阻力最理想的表达参数^[18],同时 Fr 又作为薄层水流中重要的水动力学参数,因而对于两者间关系的研究一直受到学者们的关注。潘成忠等指出, n 与 Fr 存在密切的关系^[19],翟艳宾等又进一步证明了两者的之间存在较好的幂函数关系。为了更进一步探讨两者之间存在的关系,将试验数据整理如图 5 所示。

时,通过试验数据的分析可知:曼宁系数与弗汝德数拟合通式为: $n=A/Fr^B$ 。其中: A 、 B 均为常数, A 随坡度的增加而增大, B 随坡度的变化不显著,稳定在 1.05 左右;曼宁系数与弗汝德数的拟合度均在 0.965 以上,说明两者存在幂函数关系; dn/dFr 绝对值随弗汝德数的增加而减小,最终趋近于 0,即曼宁系数与弗汝德数的变化无关。

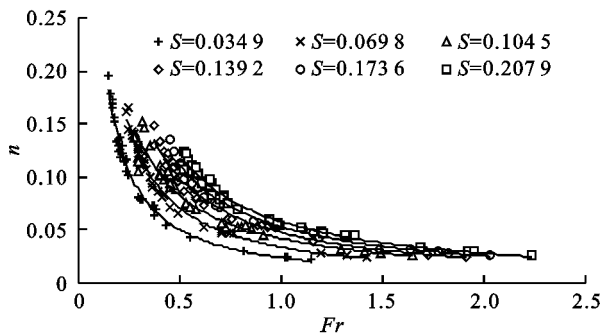


图 5 曼宁系数与弗汝德数关系

由图 5 可知:曼宁系数与弗汝德数呈单调递减的幂函数关系,即曼宁系数随着弗汝德数的增加而降低;相同弗汝德数时,曼宁系数随着坡度的增加而增大;不同坡度下的曼宁系数随着弗汝德数的增加最终都趋近于 0.025,这与前文中提到的结论一致。同

3.6 曼宁糙率系数与 Darcy-Weisbach 阻力系数的关系

曼宁系数 n 与 Darcy-Weisbach 阻力系数经常作为植被水动力学特性研究中的重要因素出现,无论是在坡面径流输沙还是阻力特性的研究过程,它们总反映出相近的规律^[19]。有学者也曾指出 Darcy-Weisbach 阻力系数与坡面粗糙单元组成存在依赖关系^[20]。故为了深入研究两水力参数之间的关系,将试验数据整理如表 1 所示。由表 1 可以得出:在双对数坐标系中,不同植被覆盖条件下对数曼宁系数与对数 Darcy-Weisbach 阻力系数呈现很好的线性关系,且相关系数均在 0.6 以上。那么,曼宁系数与 Darcy-Weisbach 阻力系数将呈现很好的幂函数的关系,且其通式将可以表示为: $n=A\lambda^B$;曼宁系数随着 Darcy-Weisbach 阻力系数的增加而增加,两者存在正相关关系。

曼宁系数与 Darcy-Weisbach 阻力系数拟合通式的指数 B 随着覆盖度的增加而增大,这说明植被覆盖度的增加使得曼宁系数与阻力系数的关系更加趋近于线性化,即指数 B 逐渐趋向于 1。拟合通式中的系数 A 数随着覆盖度的增加先增大后减小,呈单驼峰形式变化,且峰值时的覆盖度在 4.650%~6.975%之间,究其原因这可能与临界盖度有关。

通过明渠水流的相关理论可知通式中 B 值为 0.5,这与从坡面水流中得到的值很接近,但是存在着一定的差异,特别是当覆盖度偏离 4.650%~6.975%很大时,这种差异更显著。故明渠中的曼宁系数与阻力系数的关系不能直接在坡面薄层水流中直接应用。

表 1 曼宁系数与 Darcy-Weisbach 阻力系数关系

覆盖度/%	关系式	拟合度
9.300	$\lg n = 0.6568 \lg \lambda - 1.4490$	0.9792
6.975	$\lg n = 0.5360 \lg \lambda - 1.3689$	0.7427
4.650	$\lg n = 0.0472 \lg \lambda - 1.3265$	0.6128
2.325	$\lg n = 0.0428 \lg \lambda - 1.3348$	0.9589
0	$\lg n = 0.0356 \lg \lambda - 1.3748$	0.9960

4 结论

(1)曼宁系数随雷诺数、水深、坡度的变化都与植被覆盖度密切相关,当植被覆盖度 V_c 大于 4.650%时,曼宁系数随雷诺数、水深的增加而增大,随坡度的增加而减小,且覆盖度越大其变化的速率越大;当植被覆盖度 V_c 小于 4.650%时,曼宁系数随着雷诺数、水深的增加而减小,随坡度增加稳定不变;当植被覆盖度为 4.650%时,曼宁系数不随雷诺数、水深、坡度、流量改变。

(2)曼宁系数与弗汝德数成单调递减的幂函数关系,其通式可以表示为: $n = A/Fr^B$,且随着弗汝德数的增加,曼宁系数趋近于明渠粗糙系数 0.025。

(3)不同覆盖度条件下,曼宁系数与 Darcy-Weisbach 阻力系数将呈现很好的幂函数的关系,可以表示为 $n = A\lambda^B$;明渠中曼宁系数与弗汝德数之间的幂函数关系在植被坡面薄层水流中不再适用。

(4)由于本文仅对非淹没植被覆盖下的坡面流阻力特性进行了系统研究,而未涉及淹没流及柔性植被的情况,故要给出植被覆盖条件下的曼宁系数计算公式,还需要进行大量系统而深入的试验研究。

参考文献:

[1] 田凯,李小青,鲁帆. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. 中国水土保持,2010(4):44-48.
 [2] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945,56:275-370.

[3] Emmett W W. Overland flow[M]//Kirkby M J. Hill-slope hydrology. New York: John Wiley & Sons, 1978: 145-176.
 [4] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(3):74-82.
 [5] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002,13(2):159-165.
 [6] WANG Guangyue, LIU Yonghui, WANG Xinhua. Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of overland flow with geocell[J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(5):737-743.
 [7] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 模拟降雨条件下坡面水流水动力学特性试验研究[J]. 水科学进展, 2012,23(2):229-235.
 [8] 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):182-288.
 [9] 沙际德,蒋允静. 试论初生态侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性[J]. 水土保持学报, 1995,9(4):29-35.
 [10] 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.
 [11] 张宽地,王光谦,王占礼,等. 人工加糙床面薄层滚波流水力特性试验[J]. 农业工程学报, 2011,27(4):25-30.
 [12] 唐洪武,闫静,肖洋,等. 含植物河道曼宁阻力系数的研究[J]. 水利学报, 2007,38(11):1347-1353.
 [13] Fatteta M, Fu Y, Ghestemc M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength [J]. Catena, 2011,87(1):60-69.
 [14] Munoz-Carpena R, Parsons J E. A design procedure for vegetative filter strips using VFSSMOD-W[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005,47(6):1933-1941.
 [15] Dunkerley D. Flow threads in surface run-off: Implications for the assessment of flow properties and friction coefficients in soil erosion and hydraulics investigations [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(8):1012-1026.
 [16] 王玲玲,姚文艺,申震洲,等. 草被覆盖度对坡面流力学参数的影响及其减沙效应[J]. 中国水土保持科学, 2009,7(1):80-83.
 [17] 惠二青,江春波,潘应旺. 植被覆盖的河道水流纵向流速垂向分布[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009,49(6):818-821.
 [18] 梁博,张升堂,宋词. 坡面流阻力研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(5):55-64.
 [19] 潘成忠,马岚,上官周平. 含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J]. 水科学进展, 2008,19(6):857-862.
 [20] 闫旭峰,周苏芬,黄尔. 植被条件下坡面薄层水流动力学特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012,44(2):26-30.