第32卷第3期
2021年 6月
水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering
Vol. 32 No. 3
Jun., 2021

DOI:10.11705/j. issn. 1672-643X. 2021. 03. 31

草被覆盖度下坡面流流速变化及缓流机制研究

蔡泽康[1], 王 薇[1], 尚海鑫[2], 张宽地[3]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 武汉大学 水利水电学院,湖北 武汉 430072;
3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 坡面薄层水流是黄土区土壤侵蚀发生的直接动力条件,探究植被覆盖条件下坡面流水动力学特性及缓流机制,有助于揭示土壤侵蚀发生的水动力学机理。在水槽坡度为12° 条件下,通过9个草被覆盖度、7个流量的组合试验,研究了不同植被覆盖度下坡面水流流速变化和缓流机制。结果表明:坡面流流速随着覆盖度的增加整体呈减小的趋势;缓流系数随覆盖度的增加呈先增大后减小的变化规律,当覆盖度大于47.66%时,缓流系数随覆盖度的增加显著减小;以覆盖度47.66%为临界值,高、低覆盖度下缓流系数随雷诺数的变化规律有所不同。最后,建立了模拟草被下的坡面流流速和缓流系数拟合公式,验证结果表明,拟合公式精度较高,可为建立土壤侵蚀预报模型提供参考。

关键词: 草被覆盖度; 坡面流; 流速; 缓流机制

中图分类号:S157.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2021)03-0225-07

Flow velocity change and slow-flow mechanism of overland flow under different vegetation coverage

CAI Zekang[1], WANG Wei[1], SHANG Haixin[2], ZHANG Kuandi[3]

(1. *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest Agriculture and Forestryf University*, *Yangling* 712100, *China*; 2. *School of Water Resources and Hydropower Engineering*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*; 3. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A & F University*, *Yangling* 712100, *China*)

Abstract: The overland flow plays an important role in the process of soil erosion in loess areas, the study of overland flow dynamics and slow-flow mechanism under vegetation coverage is fundamental for understanding the cause of soil erosion. Here, flume experiments of slopes of 12° under different combinations of nine vegetation coverage and seven flow rates were carried out to analyze the variation of flow velocity and slow-flow mechanism. The results show that the overland flow velocity generally decreased with the increase of the vegetation coverage, whereas the slow-flow coefficient first increased then decreased with the increase of the coverage. When the vegetation coverage was larger than 47.66%, the slow-flow coefficient decreased significantly with the increase of the coverage. So, 47.66% was the critical value of the coverage, the changes of the slow-flow coefficient with those of the Reynolds number under high or low vegetation coverage followed different patterns around this tipping point. Finally, the formulas for calculating the velocity and slow-flow coefficient under the simulated vegetation coverage were then derived. The verification result shows that the formulas have high accuracy and can provide theoretical reference for the prediction of soil erosion.

Key words: vegetation coverage; overland flow; flow velocity; slow-flow mechanism

1 研究背景

黄土高原土壤结构松散,抗侵蚀能力差,由于植被覆盖易受气候变化和人为活动的影响,常发生土壤侵蚀、水土流失等环境问题[1]。植被作为黄土高原地区生态系统的重要组成部分,具有截流降雨、拦截径

收稿日期:2021-05-27; **修回日期**:2021-07-20
基金项目:国家自然科学基金项目(41877076)
作者简介:蔡泽康(2000-),男,陕西咸阳人,本科生,主要研究土壤侵蚀与水土保持。
通讯作者:张宽地(1978-),男,宁夏隆德人,博士,教授,博士生导师,主要从事水工水力学及坡面水流方向的研究。

流和拦沙固沙的作用,是防治水土流失的有效措施。

研究坡面流的水动力学特性是揭示坡面径流水力侵蚀机制首要工作[2]。流速是主要的水力要素之一,也是影响坡面侵蚀的重要因素,其变化规律与草被覆盖度、流量和坡度有关[3]。在无植被覆盖下,普遍认为流量是影响流速的主要因素,而坡度对平均流速的影响很小[4]。董杨等[5]则认为坡度对流速的影响是不能被忽略的,且在相同坡度相同流量下,流速会随着植被覆盖度的增加而减小。曹颖等[6]认为草被覆盖度在流速变化过程中比坡度和流量更具有决定性作用。

坡面水流阻力是影响土壤侵蚀和水土流失的重要因素,其演化规律受到草被覆盖度、植物种类以及粗糙度等多种因素共同影响[7]。20 世纪 70 年代以来人们对坡面流阻力进行了大量研究工作,取得了许多有益成果[8-10]。但是其中坡面流阻力系数与雷诺数二者间具体函数关系目前尚未达成共识。王文龙等[11]、张光辉[4]的研究定性地阐述了阻力系数与雷诺数二者间呈负相关,而另一部分学者则认为当存在植被时,坡面水流阻力与雷诺数已经不单纯呈负相关形式变化,而是受植被特征影响,会在不同的密度、排列方式等情况下出现不同趋势。孙菊英等[12]研究了不同高度的柔性植被对坡面流水动力特性的影响,结果表明 4 cm 左右高度的植被具有较好的阻水效果;杨婕等[13]研究表明刚性植被对流速的减缓效果优于柔性植被,这与孙菊英等[12]的研究结论相同。在许多阻力机制的研究中,试验结果都与实际相差较大,国内外虽有不少研究成果,但对于坡面水流阻力产生的机理和影响因素还无定论,有必要进行深入研究。

为了探明植被措施在减流减沙过程中的作用机制,深入研究植被覆盖对坡面水动力特性的影响,在前人研究成果的基础上,本研究在坡度为 12°的水槽中设计了 9 个覆盖度、7 个流量的组合试验,试验研究内容包括:(1)坡面流速在不同植被覆盖度下的变化规律;(2)使用缓流系数分析讨论植被覆盖度下的缓流机制;(3)建立草被覆盖条件下流速及缓流系数计算公式。研究以期揭示草被覆盖下的水力学参数演化规律,为坡面侵蚀预报以及水土保持措施的实施提供理论参考和数据支撑。

2　试验装置与方法

2.1　试验设计

研究采用定床水槽试验,水槽长为 4.5 m,宽 0.3 m,高 0.25 m,试验系统装置见图 1(a)。下垫面使用水砂纸来模拟裸坡的颗粒阻力。将整个坡面水槽划分为 3 个区域,即过渡段、植被覆盖试验段、下游段。沿程共设置 7 个观测断面,见图 1(b)。

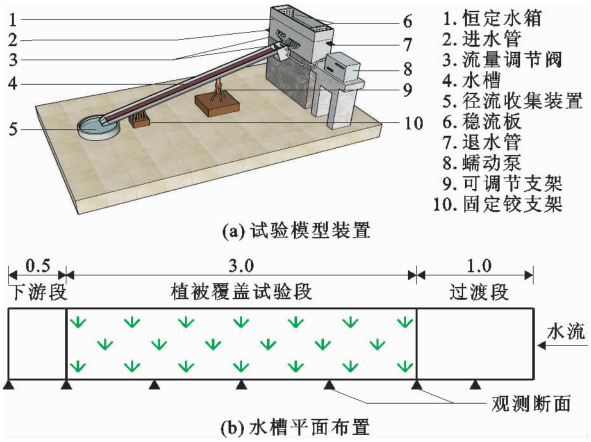


图 1　水槽试验系统模型示意图(单位:m)

试验选用仿真禾本科植物模拟坡面植被覆盖,每株草由大约 50 个高 20 mm 的针状枝条固定在底座上,所有模拟草被在水槽坡面上随机排列,以还原自然状态下的草被生长。

试验水槽按照黄土高原地区坡面常见坡度设定为 12°。考虑到引起土壤侵蚀的临界雨强以及水流动力条件,将水槽流量定为 0.08 ~0.50 L/s,共设置 7 个试验流量,分别为 0.08、0.11、0.17、0.21、0.25、0.33、0.50 L/s,试验流量由 9 个流量阀与蠕动泵共同调节,并通过坡面末端的径流收集装置进行校核。水槽植被覆盖试验段共设计 9 个植被铺设方案,其中 1 个为裸坡(无植被),各方案相应的植被覆盖情况见表 1,表 1 中植被覆盖度为植被的冠层覆盖面积与植被覆盖试验段坡面面积之比,植被覆盖密度为植被草茎总横截面积与植被覆盖试验段坡面面积之比,计算公式分别为:

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{BL} \tag{1}$$

$$C_d = \frac{n\pi r^2}{BL} \tag{2}$$

式中:C_r 为植被覆盖度;C_d 为植被覆盖密度;A_i 为第 i 株草茎的冠层覆盖面积,m^2;r 为草茎半径,mm;n 为草茎总数;L 为水槽植被覆盖试验段长度,m;B 为水槽宽度,m。

试验中水槽内水深使用水位测针进行测量,表面流速使用高锰酸钾染色剂示踪法在坡面设置的 7 个观测断面处分别观测。

表 1　植被覆盖试验段 9 个植被铺设方案及相应的植被覆盖情况

植被个数	覆盖度 C_r /%	覆盖密度 C_d /%
0(裸坡)	0	0
600	9.76	0.71
1150	19.97	1.25
2250	38.78	2.43
2800	47.66	2.96
3900	66.42	4.14
4450	76.73	4.84
5000	85.72	5.40
5550	95.01	5.94

2.2　模拟精度的判定方法

2.2.1　纳什效率系数　纳什效率系数（NSE）一般用以验证水文模型模拟计算值的准确性。NSE 取值范围为 $-\infty \sim 1$，NSE 值越接近于 1，表示模拟精度越好，模型可信度越高。其计算公式如下：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \tag{3}$$

式中：P_i 为样本模拟值；O_i 为样本实测值；$\bar{O}$ 为样本实测值的平均值；n 为样本个数。

2.2.2　决定系数　决定系数（R^2）可以反映回归方程的拟合度，用来判断回归拟合的优劣。R^2 值越接近 1，则说明拟合效果越好。其计算公式如下：

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \tag{4}$$

式中：$\hat{y}_i$ 为第 i 组阻力拟合值；y_i 为第 i 组实验实测阻力值；$\bar{y}$ 为实测阻力平均值。

2.2.3　均方根误差　均方根误差（$RMSE$）表示预测值与观测值之间差异的样本标准偏差，一般用以衡量测量的准确程度。该值越接近 0，则说明测量值越准确。其计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_i - y_i)^2} \tag{5}$$

式中：f_i 为样本的预测值；y_i 为样本的观测值；n 为样本个数。

3　结果与分析

3.1　不同草被覆盖度下水力学参数范围

表 2 为不同植被覆盖度各流量试验的坡面水流各水力学参数范围，其较好地反映了坡面流水动力学特性随植被覆盖度的变化规律。

表 2　不同植被覆盖度各流量试验的坡面水流各水力学参数范围

覆盖度/%	流量/(L·s^{-1})	水深/mm	流速/(m·s^{-1})	雷诺数 Re	淹没度 S	缓流系数 φ
0	0.08～0.50	1.65～3.73	0.168～0.447	243.38～1460.31		1.00
9.76	0.08～0.50	1.76～4.22	0.158～0.395	243.38～1460.31	0.097～0.235	0.63～0.94
19.97	0.08～0.50	1.80～4.41	0.154～0.378	243.38～1460.31	0.09～0.211	0.67～0.98
38.78	0.08～0.50	1.83～4.70	0.152～0.355	243.38～1460.31	0.083～0.221	0.70～0.93
47.66	0.08～0.50	1.94～4.71	0.143～0.354	243.38～1460.31	0.088～0.236	0.78～0.93
66.42	0.08～0.50	1.90～6.01	0.141～0.277	243.38～1460.31	0.099～0.301	0.62～0.93
76.73	0.08～0.50	2.22～6.79	0.125～0.245	243.38～1460.31	0.111～0.340	0.55～0.82
85.72	0.08～0.50	2.37～7.44	0.117～0.224	243.38～1460.31	0.119～0.372	0.49～0.77
95.01	0.08～0.50	2.65～8.11	0.105～0.206	243.38～1460.31	0.133～0.406	0.42～0.69

注：表中淹没度 S 为坡面水深与草被植株高度之比；缓流系数 φ 的计算方法见公式(6)。

由表 2 可以看出，随着覆盖度的增加，水深呈逐渐增大趋势，而坡面流速的变化趋势与水深相反。淹没度与覆盖度呈正相关变化，由低覆盖度(9.76%)时的 0.097～0.235 增加至高覆盖度(95.01%)时的 0.133～0.406。缓流系数值变化趋势与淹没度相反，由裸坡的 1.00 减小到高覆盖度(95.01%)时的 0.42～0.69。上述结果表明，覆盖度增加能显著提高坡面流的阻力。

3.2　草被覆盖度对平均流速的影响

图 2 为不同流量下坡面水流平均流速与草被覆盖度的关系曲线。

从图 2 中各曲线总体上看，坡面流速在草被覆盖条件下随流量增大而增大，随着草被覆盖度的增加而减小。各流量 9.76% 覆盖度的坡面平均流速小于裸坡的坡面平均流速，当草被覆盖度在 9.76%～47.66% 变化时，平均流速变化趋势相对较

为平缓,表明在较低的覆盖度下,草被迎水面积的增加所产生的阻力对水流影响较弱,同时小流量低淹没度下水流贴近下垫面,此时重力势能产生的流速增加趋势极大程度地削弱了草被产生的阻力,使得坡面流流速变化并不明显。当草被覆盖度在47.66% ~95.01%变化时,水流流速变化趋势与低盖度下截然不同,呈明显减小趋势。说明此时影响流速的主要因素已经从坡度转变为植被覆盖度,这一现象可以用形态阻力占比来解释。本试验是在流量一定且下垫面为水砂纸的情况下进行,在没有下渗的情况下流速可以很好地反映植被覆盖对坡面径流滞留时间的影响。相较于裸坡,植被引起的形态阻力随着覆盖度的增加逐渐超过水砂纸下垫面引起的颗粒阻力。在自然情况下,由于地表粗糙、土壤和植被物理特性的变化[14]以及枯落物的截留降雨作用,径流的滞留时间会被延长[15],从而消减了径流动能,加强了植被对水流的扰动,增加了植被对水流携带能量的耗散。结合以上分析,在植被恢复过程中,若更好发挥植被的减流作用,可将覆盖度为47.66%作为一个临界值来考虑。

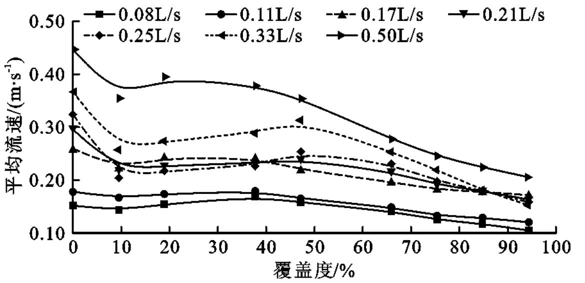


图2　不同流量下坡面水流平均流速与草被覆盖度的关系曲线

试验所测坡面流速随草被覆盖度的变化而产生波动,可能是因为试验测流速时受草被分布的影响导致平行于坡面的流速分布不均,覆盖度较低时,染色剂流动过程受草被茎叶的阻碍较少,然而较高的覆盖度下由于草被比较密集,染色剂流动过程受草被茎叶的阻碍且发生分散,导致染色剂流动相对缓慢。

3.3　草被覆盖度及水力因素对缓流系数的影响

3.3.1　*草被覆盖度对缓流系数的影响*　植被的缓流效果是水土保持研究的关键问题,许多学者通过研究植被覆盖条件下坡面流的流型流态[16]或者阻力系数来分析缓流效果,也有学者使用不同的特征长度去描述植被对坡面流的影响。但植被覆盖下缓流系数的变化规律相对复杂,这一方面的研究并不深入。

缓流系数 φ 的计算公式如下:

$$\varphi = v_{植} / v_{裸} \tag{6}$$

式中:$v_{植}$ 为不同植被覆盖度下的坡面水流平均流速,m/s; $v_{裸}$为裸坡情况下的平均流速, m/s。

通过试验与计算得出的坡面水流缓流系数与草被覆盖度的关系曲线如图3所示。

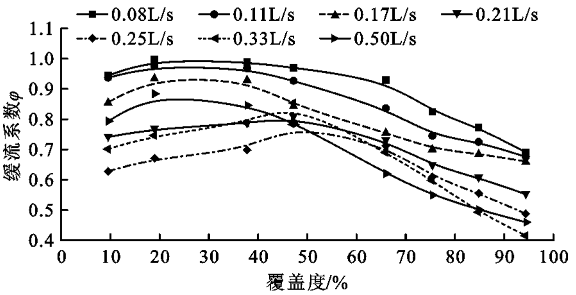


图3　不同流量下坡面水流缓流系数与草被覆盖度的关系曲线

分析图3可知,在小流量条件下,缓流系数随草被覆盖度的增大整体呈减小趋势,最后趋于平稳。如流量为0.11 L/s时,覆盖度由47.66%增大至66.42%,则缓流系数由0.93减小至0.83,变化了0.10;而覆盖度由76.73%增大至85.72%时,缓流系数由0.74减小至0.72,仅减小了0.02。同时,在较小的覆盖度下缓流系数随着覆盖度的增加还略有增大,大流量时表现尤为明显,如流量为0.21 L/s时,覆盖度由19.97%增大至38.78%,则缓流系数由0.76增大至0.79。当覆盖度继续增加,缓流系数又会呈减小趋势,且大流量缓流系数减小趋势较小流量更为明显。随着流量的增大,缓流系数变化率也会逐渐增大,如当流量为0.50 L/s时,相邻覆盖度下的缓流系数增长率可达12%。以植被覆盖度47.66%为临界值。

3.3.2　*缓流系数与雷诺数的关系*　层流与紊流的阻力机制不同,雷诺数(Re)作为判别流型流态的标准,其物理意义可以理解为水流的惯性力与黏滞力之比。缓流系数与雷诺数的关系可以反映出不同流型流态下的缓流效应,可为土壤侵蚀预报提供理论参考。图4为不同草被覆盖度下缓流系数与雷诺数的关系曲线。

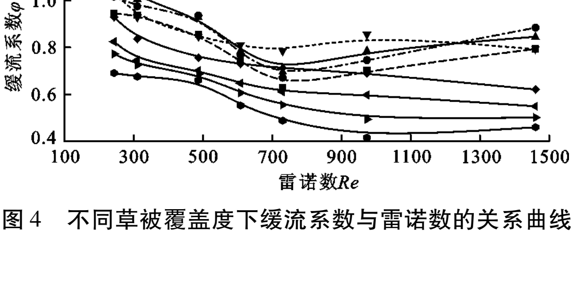


图4　不同草被覆盖度下缓流系数与雷诺数的关系曲线

由图 4 可以看出，不同草被覆盖度下缓流系数随雷诺数的增大整体呈减小趋势，但草被高覆盖度（C_r >47.66%）与低覆盖度（C_r <47.66%）下缓流系数随雷诺数的变化规律有所不同。当草被覆盖度较高时，缓流系数随雷诺数的增大先减小后趋于平稳，以 C_r =95.01%、C_r =85.72% 为例，当 Re 由 145 增大至 800 时，缓流系数分别减小了 0.21、0.22；当 Re 由 800 增大至 1 460 时，缓流系数仅分别减小 0.03、0.05，这与杨帆等[17]的研究结果相似。当草被覆盖度较低时，缓流系数随雷诺数的增大先减小而后又有所增大，以 C_r =19.97% 为例，缓流系数先由 1.02 减小到最小值 0.67，最后又增大至0.88。

究其原因，在层流范围内水流流速较低，坡面水流贴近下垫面运动，此时下垫面产生的颗粒阻力作为总阻力的主要成分，是引起缓流系数减小的重要因素。再者，本试验水槽坡度较大，小流量水流在重力作用下出现明显的失稳现象。随着雷诺数的增大，坡面水深增加，水流流动趋于稳定，低覆盖度下的形态阻力已经无法抵消流速增大带来的动能，就会出现缓流系数的增加。但在高覆盖度下，植被有效迎水面积增大，对水流的扰动程度急剧增加，水流以股流形式分散，造成明显的壅水现象，此时与低覆盖度不同，植被的阻流效果强于流量增加带来的动能，因而缓流系数继续随着雷诺数的增加而减小。其次，本试验中的仿真草呈随机排列，在放水过程中，上、下游的不对称性会随着雷诺数的增大而增强。植被下游段与上游段的流速存在差值，且差值随着植被覆盖度的增大而扩大。

3.3.3　缓流系数与淹没度的关系　植被的淹没度影响着坡面流流速分布[18-19]，对于坡面水流水动力学参数有一定的影响。在裸坡情况下，阻力系数随着水深的增加呈减小趋势，但在植被覆盖情况下，坡流淹没度由于壅水因素会出现不对称表现，如相邻植株形成的水流“十字格”现象使其水位明显低于外部（图 5）。图 6 为不同草被覆盖度下缓流系数与淹没度的关系曲线。

图 5　坡面植株形成的水流“十字格”现象

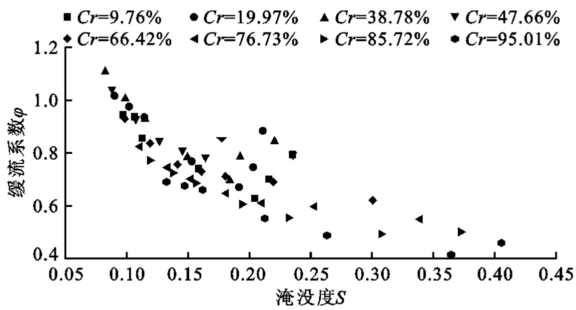


图 6　不同草被覆盖度下缓流系数与淹没度的关系曲线

由图 6 可以看出，不同草被覆盖度下缓流系数随着淹没度的增加而增大，最后逐渐稳定。本试验中测得的淹没度大部分集中在 0.12 ~0.22 之间，其中最大值可达 0.41，最小值不足 0.1。与随雷诺数的变化规律相似，低盖度下当淹没度高于一定临界值后，缓流系数会出现增大趋势。

究其原因，淹没度的增加增大了植被的迎水面积，使水流与植被的碰撞面积变大，从而加大了坡面水流的摩擦损耗，使流速分布更均匀，因而缓流系数减小。不同覆盖度下的变化趋势不尽相同，这与前文的草被覆盖度对缓流系数的影响作用机理相似，可以用形态阻力占比的变化来解释，不同草被覆盖度各试验流量下的形态阻力占比见表 3。

表 3　不同草被覆盖度各试验流量下的形态阻力占比

覆盖度/%	流量/(L·s^{-1})						
	0.08	0.11	0.17	0.21	0.25	0.33	0.50
9.76	0.1574	0.1772	0.3728	0.5926	0.7519	0.6550	0.5002
19.97	0.0510	0.0717	0.1807	0.5466	0.6979	0.5843	0.3095
38.78	0.0230	0.0864	0.1945	0.5145	0.6594	0.5125	0.3949
47.66	0.1240	0.2037	0.3977	0.4728	0.5207	0.3782	0.5033
66.42	0.1984	0.4154	0.5676	0.6113	0.6392	0.6712	0.7609
76.73	0.4399	0.5860	0.6546	0.7287	0.7725	0.7865	0.8342
85.72	0.5396	0.6190	0.6773	0.7770	0.8290	0.8798	0.8740
95.01	0.6707	0.6915	0.7119	0.8312	0.8837	0.9282	0.9027

由表3可以看出,当草被覆盖度小于66.42%时,草被的形态阻力占比随着流量的增大呈先增大后减小的变化趋势,如 C_r =9.76%时,形态阻力占比先由0.1574增加至0.7519,再减小至0.5002;再如 C_r = 38.78%时,形态阻力占比由0.02增加至0.66,最后减小至0.39。但高覆盖度下形态阻力随流量的增大而持续增大。分析其原因,在低覆盖度下,草被引起的缓流效果与流量增大所带来的动能相互抵消,其结果是形态阻力占比先增大后减小。而当草被覆盖度继续增加时,整体淹没度呈增大趋势,草被的迎水面积也增大,这极大程度上增强了草被对水流的扰动作用,从而进一步减缓了水流流速。本研究未考虑波阻力的影响,是因为试验水槽坡面平整,除了草被外并无可以引起水流分离涡和二次流耗散的粗糙元。

在薄层水流的研究中,草被形态特征也是影响坡面流的重要因素。由于本试验中的水深均小于草被高度,在淹没度逐渐增大的过程中,迎水面随着草被在垂向上的形态差异表现出扰动先稳定再增加后稳定的特征。在贴近坡面底部处,仿真草被的底座被固体胶粘接,此时底部更像是圆柱体刚性结构,而上部是呈分散状的柔性结构。已有学者对刚性植被与柔性植被的差异进行了讨论[19-23],并有研究表明刚性植被下的阻力系数增加更为显著[12],这一点与本试验结果相似,也很好地解释了淹没度下的缓流系数变化趋势。进一步分析其原因,草被柔性部分在随水流摆动中由于自身存在保持原始状态的惯性,使得贴近草被的水流滞后于周围的水流,即相对于这部分流体微团,水流存在相对运动,从而引起周围水流的不断加速或减速运动,使水流紊动增强。

圆柱绕流现象在本试验中也需要重视。Schewe[24]总结了不同雷诺数下的绕流状态,虽然本试验的雷诺数并未到达其范围,但是试验现象大多为稳定的层流分离形态,与其研究成果相类似。仿真草被刚性部分表面光滑,当淹没度逐渐增大,其绕流分离点逐渐前移,这种现象大多出现在高覆盖度下,且在高雷诺数情况下,壅水在增高的同时壅水起始点也向上移动,绕流分离点的前移带来尾流区流线角度的增大。随着草被覆盖度的增大,绕流产生的尾流区相互碰撞重叠,这一过程在淹没度较小的情况下加大了水流的能量损耗,也将更多的水推向边壁,使局部水位增加,造成流速分配不均匀。但是随着淹没度的增加,高覆盖度下的草被形态阻力大多来自仿真草被柔性部分,草被在增强对水流扰动的同时也分散了水流。仿真草被由根部光滑圆柱过渡到冠部粗糙状态,粗糙度的增加起到了稳定扰流形态的作用。此时坡面水流表面的壅水线已经不再明显,流速分配更加均匀。也有学者研究认为,粗糙圆柱体对高雷诺数状态水流会出现雷诺不相关区域[25],这可以解释高雷诺数下缓流系数趋于平稳。

3.4 流速及缓流系数拟合公式的建立

在前人的研究基础上,利用试验数据对植被覆盖度下的流速公式进行拟合,一般选取流量 q 、植被覆盖度 C_r 以及坡度 J 作为自变量进行非线性回归拟合,考虑到本试验是在坡度一定的情况下进行,所以将坡度的影响归为常数 k。公式的一般形式如下:

$$v = kq^a \qquad (C_r = 0) \tag{7}$$

$$v = k(1 - C_r)^a q^b \qquad (C_r \neq 0) \tag{8}$$

将本次试验数据代入SPSS中进行拟合,得出流速拟合公式如下:

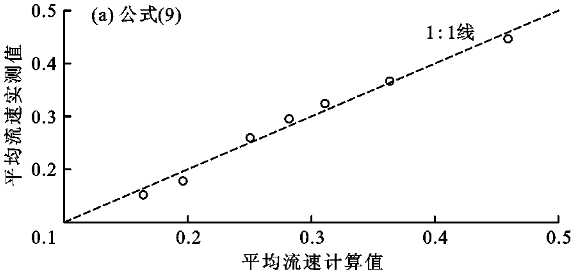
$$v = 0.678q^{0.562} \qquad (C_r = 0) \tag{9}$$

$$v = 0.529(1 - C_r)^{0.456} q^{0.219} \qquad (C_r \neq 0) \tag{10}$$

对于缓流系数公式的拟合,其参数选取与上述的流速公式相似,但是考虑到裸坡情况下的坡面阻力主要来源于下垫面的颗粒阻力,所以选取 $(1 - C_r)$ 为参数进行非线性拟合,拟合结果如下:

$$\varphi = 0.697(1 - C_r)^{-0.168} q^{0.183} \tag{11}$$

为了分析比对拟合公式(9)~(11)的准确性与可靠性,将坡面水流平均流速和缓流系数的拟合公式计算值与实测值进行对比,结果见图7、8,各公式验证指标纳什效率系数(NSE)、决定系数(R^2)及均方根误差($RMSE$)计算值见表4。



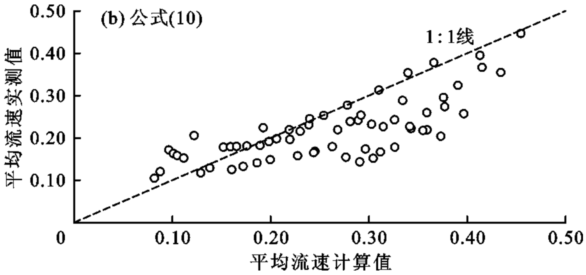


图7 坡面水流流速的拟合公式计算值与实测值对比

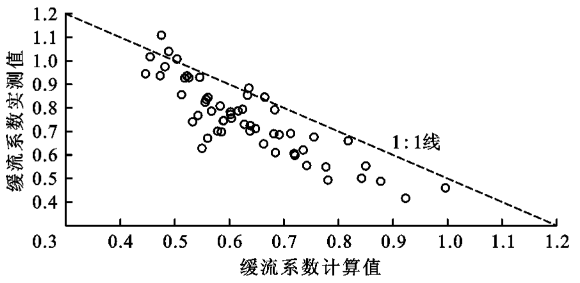


图8　坡面水流缓流系数的拟合公式计算值与实测值对比

表4　坡面水流流速及缓流系数拟合公式的检验指标值

编号	公式	NSE	R^2	RMSE
(9)	$v = 0.678q^{0.562}$	0.983	0.947	0.012
(10)	$v = 0.529(1 - C_r)^{0.456}q^{0.219}$	-0.075	0.879	0.076
(11)	$\varphi = 0.697(1 - C_r)^{-0.168}q^{0.183}$	-0.255	0.748	0.097

表4中3个拟合公式的 R^2 与 $RMSE$ 均显示计算值与实测值之间关联性强,具有较高的拟合度,且样本的误差较小。其中公式(9)的 NSE 值达到0.983,说明模型的可信度极高。而公式(10)和(11)的 NSE 值分别为 -0.075 与 -0.255,接近于0,说明该两个公式的计算值与实测值的平均值较为接近,即总体结果可信,但是模拟过程中存在个别偏离整体趋势的样品数据。结合图7、8进行分析,低流速下的实测值与模拟值拟合程度相对较好,但高流速下由于草被扰乱水流而出现模拟值偏离1:1线的现象,这也说明了草被覆盖下的坡面流变化复杂,动力学特性存在临界现象。

4　结　论

为探究坡面植被覆盖对坡面流流速以及缓流机制的影响,试验选用仿真禾本科植物模拟坡面草被覆盖,在坡度为12°的水槽内通过9个覆盖度、7个流量进行组合试验,得出主要结论如下:

(1)坡面流流速随草被覆盖度的增加整体呈减小的趋势,当草被覆盖度增加至一定程度时,流速减小趋于平缓;缓流系数随覆盖度的增加呈先增大后减小的变化规律,该规律在较大流量时更为明显;各试验流量下当覆盖度大于47.66%时,缓流系数随覆盖度的增加显著减小。

(2)以覆盖度47.66%为临界值,当草被覆盖度较高时,缓流系数随雷诺数的增大先减小后趋于平稳;当草被覆盖度较低时,缓流系数随雷诺数的增大先减小而后又有所增大。缓流系数随淹没度的变化规律与其相似。

(3)将草被覆盖度作为影响阻力系数变化的重要参数之一,由非线性回归拟合得出坡面流流速公式与缓流系数公式,均具有较高的可靠性。

在自然状态下,水中的颗粒以及下垫面的粗糙程度会改变坡面流的特性,下渗作为土壤侵蚀的重要因素也是研究重点。受本次试验条件所限,不能对壅水和下渗量进行定量分析,若对壅水演化规律进行系统分析,将有助于揭示坡面流态的归属机理。

参考文献:

[1] 苏 虹. 黄土高原地区植被覆盖变化及其原因分析[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2016.

[2] 于 朋,雷孝章,陈平安,等. 坡面流水力学特性研究的进展[J]. 四川水利,2009,30(4):40-43.

[3] 马进国,郭明航,展小云. 流速测量方法研究现状与分析[J]. 中国水土保持,2020(11):36-40.

[4] 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.

[5] 董 杨,雷孝章,胡正红. 植被覆盖下坡面流的水流特性实验研究[J]. 人民长江,2013,44(15):98-101+105.

[6] 曹 颖,张光辉,唐科明,等. 地表覆盖对坡面流流速影响的模拟试验[J]. 山地学报,2011,29(6):654-659.

[7] LING Hongbo, GUO Bin, XU Hailiang, et al. Configuration of water resources for a typical river basin in an arid region of China based on the ecological water requirements (EWRs) of desert riparian vegetation[J]. Global and Planetary Change, 2014,122:292-304.

[8] 蒋昌波,隆院男,胡世雄,等. 坡面流阻力研究进展[J]. 水利学报,2012,43(2):189-197.

[9] 甘凤玲,何丙辉,覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. 土壤学报,2019,56(4):825-837.

[10] 胡 鹏,余明辉. 坡面径流阻力计算模式对比研究[J]. 水利学报,2020,51(1):14-22.

[11] 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报,2003,(9):66-70.

[12] 孙菊英,张 璐,赵 璐,等. 不同高度柔性植被对坡面流水动力特性的影响[J]. 力学与实践,2016,38(3):283-289.

[13] 杨 婕,张宽地,杨 帆. 柔性植被和刚性植被水流水动力学特性研究[J]. 人民黄河,2017,39(8):85-89.

[14] SRIVASTAVA A, KUMARI N. MAZA M. Hydrological response to agricultural land use heterogeneity using variable infiltration capacity model[J]. Water Resources Management, 2020,34:3779-3794.

[15] 冯 浩,吴淑芳,吴普特,等. 草地坡面径流调控放水试验研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):23-25+109.

[16] 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.

(下转第240页)

of California[J]. Water Resources Research, 2017,53(7):5756 -5773.

[12] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13):142 -148.

[13] 李红颖,秦丽杰,杨 婷. 吉林省水稻生产水足迹时空分异研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):32 -39.

[14] 韩宇平,曲 唱,贾冬冬. 河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析[J]. 灌溉排水学报,2019,38(10):121 -128.

[15] 程雨菲,曹升乐,杨裕恒,等. 山东省农业水足迹周期及趋势变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018,16(4):169 -175.

[16] 高海燕,李王成,李 晨,等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(3):110 -118.

[17] 卓 拉,王 伟,冯变变,等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J]. 农业机械学报,2019,50(9):264 -271.

[18] 黄会平,张 冰,李新生,等. 海河流域农业水足迹分布及对气候变化的响应[J]. 人民黄河,2019,41(2):64 -69 +75.

[19] 周 芬,魏 婧,王 贝,等. 浙江省区域水资源承载力分析及强载措施研究[J]. 水利规划与设计, 2020(8):39 -43.

[20] 孙才志,张 蕾. 中国农产品虚拟水 -耕地资源区域时空差异演变[J]. 资源科学,2009,31(1):84 -93.

[21] 赵春芳. 基于水足迹理论的浙江省水资源可持续利用研究[D]. 宁波:宁波大学, 2017.

[22] 张 蕾. 中国虚拟水和水足迹区域差异研究[D]. 大连:辽宁师范大学, 2009.

[23] 蔡仁祥,张 慧,林宝义,等. 浙江省小麦生产现状与发展对策[J]. 分子植物育种, 2018, 16(5):1717 -1720.

[24] 雒新萍,刘晓洁. 中国典型农作物需水量及生产水足迹区域差异[J]. 节水灌溉, 2020(1):88 -93.

[25] 王 婷,毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水—虚拟耕地复合系统利用评价及耦合协调分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):40 -49 +56.

[26] 杨裕恒,曹升乐,程雨菲,等. 济南市 1997 -2014 年农业水足迹及结构变化特征分析[J]. 灌溉排水学报,2017,36(8):95 -102.

[27] 郑晓雪,秦丽杰. 不同降水年型吉林省中部玉米生产水足迹研究[J]. 浙江农业学报,2019,31(5):695 -703.

[28] 卞慧娟. 基于 GIS 和水足迹理论的山东省主要作物生产用水风险评价[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.

[29] 张旭东,吴 迪,郝 迪,等. 辽宁省玉米生产水足迹影响因素分析及空间聚类[J]. 节水灌溉, 2019(12):82 -87 +101.

[30] 赵春芳,董朝阳,伍 磊,等. 浙江省水资源生态足迹时空格局[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):242 -248.

(上接第 231 页)

[17] 杨 帆,张宽地,杨明义,等. 植被缓流效果试验研究[J]. 泥沙研究,2017,42(2):54 -60.

[18] LAWRENCE D S L. Macroscale surface roughness and frictional resistance in overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1997,22(4):365 -382.

[19] 谢 艳,朱崇林,雷孝章. 含植被坡面水动力学特性的实验研究[J]. 中国农村水利水电,2021,(2):18 -23.

[20] 赵卫伟,景何仿,王维红,等. 刚性植被作用下复合明渠水流特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2020,35(4):469 -478.

[21] 李树慧,张银华,蔡怀森. 河岸刚性植被缓冲带对水流阻力的影响[J]. 水电能源科学,2020,38(9):32 -35.

[22] 张 璐,刘渊博,雷孝章. 黑麦草密度对坡面水流阻力影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(6):99 -106.

[23] 熊 杰,袁野平,林颖典. 浸没及非浸没刚性短植被群对异重流运动特性的影响[J]. 上海交通大学学报,2020,54(3):285 -294.

[24] SCHEWE G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics,1983,133 :265 -285.

[25] SHIH W, WANG C, COLES D, et al. Experiments on flow past rough circular cylinders at large Reynolds numbers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1993,49(1 -3):351 -368.